

Ivan Olszanski Pigozzo

**SOLDAGEM TIG ORBITAL: OTIMIZAÇÃO DE
EQUIPAMENTOS E PROSPECÇÕES TECNOLÓGICAS PARA
PROCEDIMENTOS DE PASSE DE RAIZ**

Dissertação submetida ao
Programa de pós-graduação em
Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos
Dutra

Coorientador: Prof. Dr. Régis
Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis

2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pigozzo, Ivan Olszanski

SOLDAGEM TIG ORBITAL: OTIMIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E
PROSPECÇÕES TECNOLÓGICAS PARA PROCEDIMENTOS DE PASSE DE RAIZ
/ Ivan Olszanski Pigozzo ; orientador, Prof. Dr. Jair
Carlos Dutra ; coorientador, Prof. Dr. Regis Henrique
Gonçalves e Silva. - Florianópolis, SC, 2015.

132 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem Orbital. 3. Passe de
Raiz. 4. GTAW / TIG. I. Dutra, Prof. Dr. Jair Carlos. II.
Silva, Prof. Dr. Regis Henrique Gonçalves e. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Ivan Olszanski Pigozzo

**SOLDAGEM TIG ORBITAL: OTIMIZAÇÃO DE
EQUIPAMENTOS E PROSPECÇÕES TÉCNOLÓGICAS PARA
PROCEDIMENTOS DE PASSE DE RAIZ**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 04 de Março de 2015.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Junior, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. - Orientador

Prof. Regis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng. - Coorientador

Prof. Carlos Enrique Niño Bohérquez, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Norton Zanette Kejelin, Dr. Eng.
PETROBRAS / CENPES / PDEP / TMEC

Raul Gohr Junior, Dr. Eng.
IMC - Engenharia de Soldagem Instrumental e Automação

Prof. Giovani Dalpiaz, Dr. Eng
PETROBRAS / CENPES

AGRADECIMENTOS

Em se tratando de um trabalho de P&D científico-tecnológico, agradeço primeiramente àqueles que participaram diretamente no desenvolvimento do estudo neste texto documentado. Assim sendo, agradeço primeiramente à toda equipe do Labsolda: aos professores Jair Carlos Dutra e Regis Henrique Gonçalves, pela oportunidade e orientação ao trabalho, e todo o conhecimento transmitido ao longo dos anos de minha formação acadêmica; à Márcia Thiel por toda gestão financeira e burocrática necessária; à Ricardo Campagnin e Fernando Costenaro, pelas horas reservadas para manutenção e programação dos equipamentos; à Gean Gustavo e João Facco, pelas modelagens e fabricação de equipamentos desenvolvidos neste trabalho; à Raul Gohr, pelo suporte e desenvolvimento das fontes de soldagem; à André Pires, Julia Dornelles e Guilherme Bernhard, pelos trabalhos metalográficos; e aos demais colegas Renan Kindermann, Erick Gonzales, Francisco Sartori, Cleber Marques, Alberto Bonamigo, Ramom Meller e Rafael Barbosa, pelas discussões e reflexões sobre tecnologia de soldagem.

Agradeço também ao departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, mais especificamente ao PósMec (secretários administrativos e professores), e à ANP e Petrobrás, pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

Gratifico agora àqueles que não participaram do trabalho, mas que foram de suma importância pelo companheirismo durante esta jornada. Agradeço então a todos os amigos e amigas, em especial ao Mariano, Gui, Mag e Zé. Gratidão pelas sinceras amizades.

Agradeço também à Juliana Okawati, pessoa a qual mudou a minha vida. Eterna gratidão por existir e fazer de mim, e todos ao seu redor, pessoas de bem.

Aos meus irmãos Victor e Hugo, pelo carinho e companheirismo ao longo de todos os anos.

Finalizo então, agradecendo aos meus pais Victor e Sônia, principais motivadores. Pelo respeito, carinho, suporte e conselhos dados ao longo de minha vida.

A todos, meu sincero muito obrigado.

“Desde o começo do mundo, que o homem sonha com a paz. Ela está dentro dele mesmo. Ele tem a paz e não sabe. É só fechar os olhos e olhar pra dentro de si.”

(Todos Estão Surdos - Roberto Carlos)

RESUMO

As obras de construção de tubulações e dutovias para o transporte de matéria, principalmente na indústria do petróleo e gás, apresentam na atualidade constante crescimento, causando relevantes impactos econômicos e produtivos para o desenvolvimento do país. Neste tipo de obra, as etapas de soldagem são um fator determinante para melhores produtividades, em relevância, o passe de raiz. Atualmente, a soldagem manual com Eletrodo Revestido e TIG ainda são predominantes, porém este cenário vem mudando à medida que equipamentos e procedimentos automatizados são desenvolvidos. Dentre as tecnologias presentes, a soldagem TIG orbital mecanizada tem se apresentado como uma boa solução para os passes de raiz e preenchimento, principalmente na soldagem de ligas especiais. Contudo, o Brasil ainda não detém a tecnologia de fabricação de equipamentos desta natureza e tampouco existem metodologias e banco de informações referentes a procedimentos de soldagem para estas aplicações. A fim de contribuir para o desenvolvimento científico-tecnológico, o presente trabalho abrange as duas carências citadas. Primeiramente, buscou-se a otimização do sistema orbital (cabeçote e fonte de soldagem) a partir de melhorias no sistema AVC (*Arc Voltage Control*), programa da fonte de soldagem, dispositivos mecânicos do cabeçote, etc., capacitando o equipamento protótipo às operações orbitais. A segunda parte do trabalho concerne aos ensaios de bancada. Estes foram realizados sobre juntas chanfradas de tubulações de aço baixa liga com 406,4 mm (16") de diâmetro e parede de 12,7 mm (1/2"). O estudo abrange desde as etapas de fabricação dos corpos de prova à levantamento de procedimento em 360°. Foram analisadas questões quanto à geometria do cordão nas diferentes posições de soldagem, técnica de alimentação de arame, descontinuidades, geometria do bisel, entre outras. Para isto, alguns equipamentos foram utilizados tais como câmera filmadora, sistema de aquisição de dados e *software* para edição de imagens e modelagem 3D. Os resultados obtidos mostraram competência do equipamento, bem como o levantamento e compreensão da problemática e de fatores determinantes e influentes na soldagem TIG orbital.

Palavras-chave: Soldagem TIG Orbital; Passe da Raiz; Soldagem Mecanizada; Petróleo e Gás.

ABSTRACT

The construction of pipelines for matter transportation, mainly in the Oil & Gas industry, has shown constant growth, causing significant economics and productive impacts on the country's development. In this kind of building, the determining factors for best yields are welding stages, in relevance, the root pass. Currently, manual welding with Stick Welding or TIG are still prevalent, but this scene is changing as automated equipment and procedures are developed. Among these technologies, mechanized orbital TIG welding has emerged as a good solution for the root pass and filling passes, especially for the welding of special alloys. However, Brazil still does not have the manufacturing technology of these equipments, nor are methodologies and knowhow for welding procedures for these applications. In order to contribute to the scientific and technological development, this paper covers the two aforementioned shortcomings. First, the optimization of orbital system (head and welding source) from improvements in AVC (Arc Voltage Control), power source program, mechanical devices, weldhead, etc., enabling the prototype equipment for orbital operations. The second part concerns the welding tests. These were carried out on beveled joints of low alloy steel pipes with 406.4 mm (16 ") in diameter and 12.7 mm wall (1/2"). The study covers from the manufacturing stages of the specimens to the specification of a 360° root pass procedure. Questions regarding the bead geometry in the different welding positions, wire feeding technique, discontinuities, bevel geometry, among other factors were analyzed. For this purpose, some devices have been used such as camcorder, data acquisition system and software for image editing and 3D modeling. The results showed the reliability of the equipment, technical and operational knowhow of orbital TIG welding.

Key-words: Orbital TIG Welding; Root Pass, Mechanized Welding; Oil & Gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - a) Curva tensão x corrente do arco TIG para diferentes distancia entre eletrodo peça; b) Curva tensão x comprimento do arco TIG (4)	29
Figura 2 - Construção de linhas dutoviárias terrestres. À esquerda: Faixa de domínio e distribuição dos tubos; à direita: Cabines de soldagem...	33
Figura 3 - Processos de fabricação de tubulações <i>Offshore</i> . Superior: <i>SpoolBase</i> ; inferior: Embarcação com <i>line-up</i> de soldagem	34
Figura 4 - Cabeçotes de câmara fechada. Fabricantes: à esquerda: SPS - Soluções para Soldagem; à direita: Arc Machines Inc.	37
Figura 5 - Cabeçotes de câmara aberta. Fabricantes a: Arc Machines Inc.; b: SPS - Soluções para Soldagem; c: Magnatech.....	38
Figura 6 – À esquerda: Passe de Raiz; à direita: Junta preenchida. Espessura de parede: 19,05 mm (3/4").	39
Figura 7 - Chanfro em V comumente utilizados em procedimentos manuais. Adaptado de (21).....	40
Figura 8 - Chanfro recomendado para soldagem orbital mecanizada. Adaptado de (21).....	41
Figura 9 - Soldagem Orbital com chanfro <i>NarrowGap</i> (22). À esquerda: Seção metalográfica da junta; à direita: equipamento para soldagem <i>NarrowGap</i>	41
Figura 10 - Penetração incompleta na raiz. Adaptado de (24)	43
Figura 11 - Penetração incompleta devido à presença de desnivelamento. Adaptado de (24).....	43
Figura 12 - Concavidade da raiz. Adaptado de (24).....	44
Figura 13- Bancada de ensaios: 1) Cabeçote orbital; 2) Tubulação estande; 3) Unidade de refrigeração; 4) IHM do cabeçote; 5) Cilindro de	

gás de proteção; 6) Fonte de soldagem; 7) Cabeçote alimentador de arame; 8) Unidade de controle do cabeçote; 9) Sistema de aquisição de dados.	46
Figura 14 – Bancada para corte dos tubos	47
Figura 15 – Biseladora Protem US150.....	47
Figura 16 - Chanfro “J” padrão dos ensaios de soldagem.....	48
Figura 17- À esquerda: Alinhador externo de tubulação; à direita: Junta alinhada.....	48
Figura 18 – Representação das posições de soldagem orbital.....	50
Figura 19 – Representação da curva estática TIG para diferentes DEP. Variação da Tensão de acordo com a variação da corrente de soldagem	54
Figura 20 – Oscilograma de tensão e corrente com controle de tensão a partir de uma única referência.....	55
Figura 21- Variação da DEP entre pulso e base no ensaio com controle do AVC a partir de uma tensão de referência média.....	56
Figura 22 – Variação da DEP no período de base (esquerda) e período de pulso (direita) no ensaio com controle do AVC a partir de uma tensão de referência.....	56
Figura 23 – Representação da posição de entrada do arame com a variação da DEP.....	57
Figura 24- Representação da curva estática do processo TIG. Variação da tensão com a variação da corrente de soldagem.....	58
Figura 25- Interface da fonte de soldagem – Programação do processo TIG pulsado sincronizado 1ª versão.....	60
Figura 26 - Interface da fonte de soldagem – Programação do processo TIG pulsado sincronizado versão aprimorada.....	61

Figura 27 – Representação do sincronismo em modo de tecimento trapezoidal.....	63
Figura 28 – IHM do cabeçote orbital – Programação dos modos sincronizados.....	65
Figura 29 - Oscilograma de tensão e corrente com controle de tensão a partir de duas referências.....	66
Figura 30 – Modelo em CAD e protótipo fabricado do direcionador de arame. 1) Conexão e mangueira pneumática; 2) Bico de contato MIG/MAG; 3) Sistema de fixação à tocha.....	67
Figura 31 - Modelo em CAD e protótipo fabricado do direcionador de arame com regulagem de angulo. 1) <i>Knob</i> para regulagem do ângulo de alimentação; 2) <i>knob</i> para alinhamento do arame com o eixo do cordão; 3) bico de contato MIG/MAG; 4) conexão e mangueira pneumática; 5) Sistema de fixação à tocha.....	68
Figura 32 – Modelo e CAD e direcionador de arame final. 1) sistema de fixação do bico de contato otimizado; 2) sistema de fixação à tocha otimizado.....	69
Figura 33 - Suporte de tocha projetado	70
Figura 34- Macrografias das posições referentes à 12h, 9h, 6h e 3h do CPJ04	72
Figura 35 – Representação do processo de adoçamento (usinagem do diâmetro interno).....	74
Figura 36 – Seção transversal de um bisel adoçado (esquerda) e não adoçado (direita).....	75
Figura 37 – Macrografias dos ensaios com variação do adoçamento ao longo do cordão de solda.....	76

Figura 38 – Macrografias dos ensaios com variação do adocamento ao longo do cordão de solda. Repetição do ensaio	78
Figura 39 – ID-Tracker. 1)Rolete apalpador; 2) Ferramenta de corte...	79
Figura 40 - Resultado da usinagem dos chanfros com o ID-Tracker....	79
Figura 41 – Trecho do oscilograma de tensão, corrente e velocidade de arame do ensaio orbital 360° sem variação de parâmetros (CPJ07). Posição Plana	82
Figura 42 - Macrografias do CPJ08. Seções transversais de cada posição de soldagem	83
Figura 43 - Gráficos do Fator de forma e Reforço da raiz dos CPJ07 e 08	84
Figura 44 - Gráficos de Largura do cordão e Altura do cordão dos CPJ07 e 08	85
Figura 45 – Variação do desnivelamento (<i>high-low</i>) de acordo com a posição de soldagem – Ensaio CPJ09	86
Figura 46- Macrografias do CPJ09. Seções transversais de cada posição de soldagem	87
Figura 47 - Gráficos comparativos entre valores médios dos CPJ07 e 08 com o CPJ09. Largura, altura e fator de forma do cordão respectivamente.....	88
Figura 48 - Macrografias do CPJ012. Seções transversais das posições 9h, 8h e 7h.....	91
Figura 49 - Macrografias do CPJ013. Seções transversais das posições 9h, 8h e 7h.....	93
Figura 50 - Macrografias do CPJ014. Seções transversais das posições 9h, 8h, 7h e 6h.....	94

Figura 51 - Macrografias do CPJ015. Seções transversais das posições 9h, 8h, 7h e 6h.....	95
Figura 52 - Gráficos comparativos entre valores médios dos CPJ07 e 08 com o CPJ12 e 13. Altura, Largura, Concavidade da raiz e fator de forma do cordão respectivamente.....	97
Figura 53 - Gráficos comparativos entre valores médios dos CPJ07 e 08 com o CPJ14 e 15. Concavidade da raiz, largura, altura e fator de forma do cordão respectivamente	99
Figura 54 – Gráfico comparativo entre valores dos CPJ13 e 15. Concavidade da raiz	100
Figura 55 - Macrografias do CPJ16. Seções transversais de cada posição de soldagem.....	102
Figura 56 - Gráfico comparativo entre valores dos CPJ07, 08 e 16. Concavidade da raiz	103
Figura 57 - Gráfico comparativo entre valores dos CPJ07, 08 e 16. Fator de forma	103
Figura 58 – Comparação entre alimentação pela frente (A) e por trás (B) do arco.....	105
Figura 59 - Oscilogramas de tensão. Superior: Alimentação contínua; Inferior: Alimentação destacada.....	107
Figura 60 – Quadros de da filmagem dos destacamentos da “ponte” arame-poça de fusão.....	108
Figura 61 – Superior: Alimentação contínua; Centro: Alimentação destacada constante; Inferior: Alimentação destacada grosseira.....	109
Figura 62 - Oscilogramas de corrente e velocidade de arame. Destacamento no início do pulso.....	110

Figura 63 - Quadros da filmagem dos destacamentos no início do período de pulso.....	111
Figura 64 – Macrografias dos cordões com alimentação destacada (à esquerda de cada metalografia) e alimentação contínua (à direita).....	113
Figura 65 - Gráficos comparativos entre alimentação contínua e destacada.....	114
Figura 66 - Macrografias do ensaio orbital em 360° com alimentação destacada.....	116
Figura 67 – Gráficos comparativos entre passe de raiz com alimentação destacada e contínua.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem do ensaio com controle de corrente a partir de uma tensão de referência.....	55
Tabela 2 – Parametrização do ensaio com controle de tensão feito a partir de duas referências.....	67
Tabela 3 – Parametrização do ensaio orbital preliminar – CPJ04.....	71
Tabela 4 – Parâmetros fixos do ensaio orbital preliminar - CPJ04	71
Tabela 5 - Aumento da área com o aumento do adoçamento.....	75
Tabela 6 – Parâmetros do ensaio com variação do adoçamento ao longo do corpo de prova.....	76
Tabela 7 – Variação da área fundida com a variação do adoçamento...	77
Tabela 8 – Parâmetros dos ensaios CPJ07 e CPJ08	81
Tabela 9 – Parâmetros médios retirados do SAP – CPJ07 Posição plana	82
Tabela 10 – Parâmetros do ensaio CPJ12	90
Tabela 11 – Variação da tensão do arco de acordo com a posição de soldagem – CPJ12	90
Tabela 12 – Parâmetros do ensaio CPJ13	91
Tabela 13 – Variação dos parâmetros – CPJ13	92
Tabela 14 – Parâmetros do ensaio CPJ14 e 15.....	94
Tabela 15 - Parâmetros do ensaio CPJ16	101
Tabela 16 – Parâmetros do ensaio comparativo entre alimentação pela frente e por trás do arco.....	105
Tabela 17 – Parâmetros dos ensaios comparativos entre alimentação contínua e destacada.....	112

LISTA DE ABREVIATURA, SIGLAS E SIMBOLOS

TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
MIG/MAG	<i>Metal Inert/Active Gas</i>
AVC	<i>Arc Voltage Control</i>
PLSV	<i>Pipe-Laying Support Vessel</i>
DEP	<i>Distância Eletrodo-Peça</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission</i>
<i>of Radiation</i>	
STT	<i>Surface Tension Transfer</i>
CCC	<i>Curto Circuito Controlado</i>
IHM	<i>Interface Homem-Máquina</i>
SAP	<i>Sistema de Aquisição Portátil</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
AWS	<i>American Welding society</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
DNV	<i>Det Norske Veritas AS</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
ID	<i>Internal Diameter</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
PP	<i>Posição plana</i>
VD	<i>Vertical Descendente</i>
SC	<i>Sobre-Cabeça</i>
VA	<i>Vertical Ascendente</i>
CPJ	<i>Corpo de Prova com Chanfro J</i>
Zm	<i>Zona morta do AVC</i>
Kp	<i>Constante de Correção do AVC</i>
Uref	<i>Tensão de Referência</i>
Ib	<i>Corrente de Base</i>
Ip	<i>Corrente de Pulso</i>
Vap	<i>Velocidade de Arame no Pulso</i>
Vab	<i>Velocidade de Arame na Base</i>
DEA	<i>Distância Eletrodo-Arame</i>
TIG SINCRO	<i>Tig Sincronizado</i>
nP	<i>Numero de Passos</i>
Rt	<i>Relação de Transmissão</i>
P	<i>Passos</i>
Vs	<i>Velocidade de Soldagem</i>
ts	<i>Tempo de Sincronismo</i>
S	<i>Percentual de Amplitude para Sincronismo</i>

A	Amplitude
t1	Tempo de Sincronismo índice 1
t2	Tempo de Sincronismo índice 2
LP	Lado Positivo
LN	Lado Negativo
U1	Tensão de Referência índice 1
U2	Tensão de Referência índice 2
e	Espessura
R	Raio de curvatura
n	Espessura de Nariz do Bisel
A	Adoçamento
Dest.	Alimentação Destacada
Cont.	Alimentação Contínua
θ	Ângulo de Alimentação de Arame

SUMÁRIO

RESUMO.....	IX
ABSTRACT.....	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XIX
LISTA DE ABREVIATURA, SIGLAS E SIMBOLOS.....	XXI
1 INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS.....	27
1.1.1 Objetivos específicos	27
1.2 ESTRUTURA DO TEXTO.....	27
2 FUNDAMENTOS DO PROCESSO TIG E SOLDAGEM ORBITAL 29	
2.1 PROCESSO TIG	29
2.2 SOLDAGEM ORBITAL	32
2.2.1 Montagem e fabricação das dutovias terrestres (onshore) e subaquáticas (offshore)	32
2.2.2 Processo de Soldagem Orbital	34
2.2.3 Equipamentos TIG orbital	36
2.3 SOLDAGEM DE PASSE DE RAIZ	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 BANCADA DE ENSAIOS E CONSUMÍVEIS.....	45
3.2 CORPOS DE PROVA.....	46
3.3 METODOLOGIA	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1 OTIMIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO	53
4.1.1 AVC e Sincronismo – Aprimoramento do método controle da altura do arco para processos em corrente pulsada	53
4.1.1.1 Controle feito a partir de uma única tensão de referência.....	54
4.1.1.2 Controle feito a partir de duas tensões de referência independentes para cada fase.....	58
4.1.2 Sincronismo fonte - cabeçote.....	59
4.1.2.1 Interface e programa da fonte de soldagem	59
4.1.2.2 Interface e programa do cabeçote	62
4.1.3 Resultado a partir de um programa sincronizado.....	66
4.1.4 Dispositivos mecânicos	67
4.2 ENSAIOS ORBITAIS.....	70

4.2.1	Ensaios orbitais em corpos de prova adoçados	70
4.2.1.1	Ensaio Orbital 360° preliminar (CPJ 04)	70
4.2.1.2	Detecção da influência do adoçamento sobre a penetração da raiz	73
4.2.1.3	Influência da usinagem de adoçamento sobre o procedimento de soldagem (CPJ 05, 06 e CPJAd)	73
4.2.2	ID-Tracker (Internal Diameter Tracker)	78
4.2.3	Ensaios orbitais sobre corpos de prova sem adoçamento.....	80
4.2.3.1	Ensaios orbitais em 360° sem variação de parâmetros (CPJ07 e CPJ08)	80
4.2.3.2	Ensaios orbitais 360° com presença de High-low (CPJ09).....	85
4.2.3.3	Ensaios orbitais com variação de parâmetros (CPJ12, 13, 14 e 15)	89
4.2.3.4	Ensaio orbital 360° com variação de parâmetros (CPJ16).....	100
4.2.4	Análise da técnica de alimentação de arame sobre o comportamento do processo.....	104
4.2.4.1	Ensaio comparativo entre alimentação pela frente e por trás do arco.	105
4.2.4.2	Fatores que causam alimentação destacada e suas influências sobre o procedimento	106
5	CONCLUSÕES	119
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
	APÊNDICE A	129

1 INTRODUÇÃO

Desde que a soldagem orbital passou a ser aplicada na indústria, isto é, a partir da década de 1960, quando pela primeira vez utilizada na soldagem de tubulações (*pipelines*), a tecnologia vem sofrendo constantes aprimoramentos e otimizações. Atualmente, é possível encontrar equipamentos de altíssima qualidade aplicados em diversos ramos da indústria, por exemplo, indústria petroquímica, alimentícia, naval e aeroespacial.

As recentes descobertas das camadas do pré-sal, anunciadas pela Petrobras em 2006, e sucessivos recordes de produção/exploração de petróleo, preveem uma crescente demanda para fabricação, construção, e manutenção de equipamentos, como por exemplo, linhas dutoviárias (*pipelines*), para a extração e transporte de tal matéria. Por exemplo, em 2014, no mês de outubro foi registrado o recorde de produção em toda história de exploração da Petrobrás. Foram em média 2 milhões 126 mil barris/dia (bpd) segundo o registro (1).

Colocando em números, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2012 (2), a malha dutoviária brasileira contava com aproximadamente 7882 km até 2012, e até 2021 seriam investidos na ordem de U\$14,0 bilhões de reais apenas pela Petrobras em obras de dutos e terminais. Ademais, segundo a empresa americana *Quest Offshore*, prevê-se uma expansão de 8000 km de dutos submarinos até 2017, correspondendo aproximadamente 19% do mercado mundial. Em relação aos anos anteriores (2006 à 2012), este aumento é da ordem de 80% (3).

Processos de união, revestimento e reparos metálicos realizados por soldagem têm um papel fundamental nas obras do ramo anteriormente citado. Além das incumbências impostas pela exploração e transporte da matéria, pode-se dizer que um dos desafios encontrados nas paradas programadas de manutenção das linhas de transportes duto viárias são os prazos, principalmente quando estas paradas envolvem construção de novas linhas. Assim sendo, processos automáticos e/ou semi-automáticos de soldagem são imprescindíveis para melhores desempenhos, uma vez que, procedimentos de soldagem são críticos em questão de tempo (cronograma de obra depende da produtividade dos processos) e de qualidade (qualidade da solda depende de robustez e estabilidade do processo). Surge, então, o interesse em aumento da produtividade, qualidade e robustez destes processos por intermédio de pesquisa, desenvolvimento e inovações tecnológicas.

As linhas de pesquisa no ramo orbital, em especial nos procedimentos de passe de raiz, estão sintonizadas com os desafios encontrados em campo, onde a execução destes procedimentos é ditada principalmente pelas habilidades e técnicas dos soldadores disponíveis. Neste caso, aspectos tecnológicos e novas tendências de produção/fabricação, as quais buscam repetibilidade e qualidade, não cumprem papel algum, retardando o desenvolvimento de processos/procedimentos automatizados no Brasil.

Atualmente, na grande maioria das obras dutoviárias, os procedimentos de passe de raiz são executados manualmente pelos processos TIG e Eletrodo Revestido. Ambos apresentam baixa produtividade e repetibilidade. Uma alternativa à este processo, tem sido a aplicação de processos semi-automáticos MIG/MAG, os quais apresentam, atualmente, maior produtividade em relação aos processos TIG e Eletrodo Revestido. Embora mais produtivo, os processos MIG/MAG tendem a apresentar elevados níveis de descontinuidades (mordeduras, falta de fusão, respingos, etc.), por isso, existem severas restrições na aplicação destes em equipamentos sujeitos a pressões internas. Já o processo TIG apresenta excelente qualidade com baixo nível de defeitos, consequentemente, menos retrabalho, porém os ciclos de arco aberto, geralmente, são mais longos, devido à baixa velocidade de soldagem empregada.

Uma proposta à soldagem manual são os equipamentos de soldagem orbital mecanizada, conhecido como cabeçotes orbitais. Tanto processos MIG/MAG, quanto TIG têm sido utilizados na soldagem de tubulações mundo afora.

Ademais, recentes fabricantes de tecnologias do processo TIG com alimentação de arame automática afirmam conseguir produtividades competitivas em relação aos processos MIG/MAG e com índices de defeitos menores, viabilizando, economicamente e produtivamente, sua aplicação. Neste caso, a produtividade não se relaciona apenas aos períodos de arco abeto, mas sim a redução de retrabalho, diminuição de volume da junta, etc.

Neste contexto, o presente trabalho buscou o fortalecimento do *know how* da tecnologia de soldagem orbital mecanizada, focado exclusivamente na soldagem TIG orbital em procedimentos de passe de raiz. As direções do estudo estarão voltadas para vertente do processo TIG com alimentação de arame frio. O trabalho propõe o desenvolvimento de tecnologia, concernindo tanto equipamento quanto procedimentos, além de levantar os aspectos relevantes que englobam a soldagem TIG orbital

1.1 OBJETIVOS

O foco do trabalho em questão está na pesquisa e desenvolvimento de procedimentos e equipamentos TIG Orbital, a fim de obter melhores desempenhos, maior qualidade e eficácia na soldagem orbital de tubos, enfatizando os procedimentos de passe de raiz. Deseja-se obter conhecimento aprofundado na problemática, bem como as soluções que a tecnologia apresenta como um todo, abrangendo fatores externos e internos ao processo em si.

1.1.1 Objetivos específicos

O objetivo principal concerne várias atividades as quais definiram os objetivos específicos. São eles:

- Otimizar o sistema orbital através de aprimoramentos no sistema de controle de tensão (AVC), suportes de tocha, cinta trilho, direcionador de arame, interface, programa de sincronismo fonte/cabeçote, entre outros subsistemas;
- Observar o comportamento do processo diante das diferentes posições de soldagem e propor metodologias de soldagem que compensem possíveis variações;
- Levantar um procedimento TIG orbital com alimentação automática de arame para soldagem de passe de raiz em 360°, isto é, em um único passe;
- Verificar influência da metodologia de alimentação do arame sobre os resultados do procedimento;
- Determinar fatores “extras” que influenciam diretamente no procedimento orbital.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

O presente texto foi estruturado em seis capítulos, sendo o primeiro deles, uma breve introdução ao tema e definição dos objetivos. Em seguida, o segundo capítulo faz uma revisão sobre o processo TIG e sobre a soldagem Orbital de tubulações, colocando os aspectos relevantes às técnicas atuais e problemática, enfatizando, principalmente, ao passe de raiz. Ademais, comenta-se sobre os equipamentos existentes e os critérios de aceitabilidade segundo a norma API1104.

O terceiro capítulo concerne o que se refere ao aparato experimental, materiais utilizados e metodologia empregada.

O capítulo 4, referente à descrição, resultados e discussões, foi dividido em duas partes. A primeira delas refere-se ao o que foi desenvolvido na parte de equipamentos (fonte de soldagem e cabeçote orbital). Na segunda parte, os ensaios são detalhados, parametrizados e discutidos a partir dos resultados obtidos. A cronologia dos ensaios neste documento descritos segue a mesma sequência de realização ao longo do estudo. Assim sendo, o leitor perceberá que algumas conclusões são feitas à medida que os ensaios são discutidos.

O quinto capítulo se refere às conclusões e considerações finais, seguido das propostas de trabalhos futuros, no capítulo 6.

2 FUNDAMENTOS DO PROCESSO TIG E SOLDAGEM ORBITAL

2.1 PROCESSO TIG

O processo TIG (do inglês *Tungsten inert gas*) é caracterizado por um arco voltaico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, dito não consumível, e a peça a ser soldada. Um fluxo de gás inerte faz a proteção do eletrodo e da poça de fusão à oxidação e também, ao ser ionizado, propicia a condução de corrente elétrica (4). Os gases comumente utilizados são Argônio, Hélio, ou uma mistura entre os mesmos. Em alguns casos, misturas de gases com Hidrogênio e Nitrogênio também podem ser utilizadas.

Neste processo, com exceção da soldagem de alumínio e alguns outros materiais, o eletrodo de tungstênio é mantido na polaridade negativa (cátodo), sendo a peça então, o pólo positivo (ânodo) do arco elétrico. Os eletrodos normalmente são dopados de algum elemento de liga, os quais lhes propiciam propriedades que melhoram a estabilidade, bem como a ignição do arco elétrico (5). Podem ser citados o tório (Th), o lantânio (La), zircônio (Zr) e cério (Ce) como exemplos de elementos dopantes.

Ademais, a variável de controle é a corrente, portanto fontes de comando de corrente devem ser utilizadas. Um dos motivos pode ser mostrado pelo comportamento da curva tensão x comprimento do arco TIG (Figura 1).

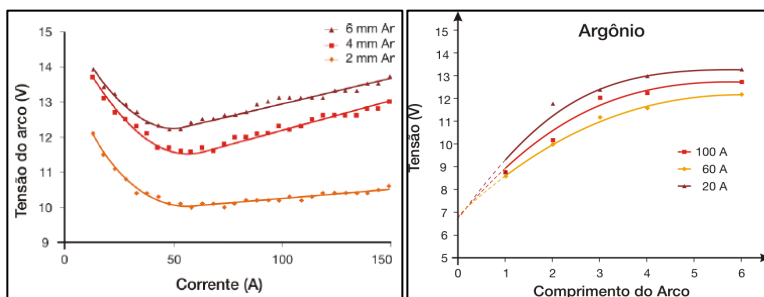


Figura 1 - a) Curva tensão x corrente do arco TIG para diferentes distancia entre eletrodo peça; b) Curva tensão x comprimento do arco TIG (4)

Em correntes relativamente baixas, a mancha catódica possui temperatura relativamente baixa e, por isso, a emissão termiônica (fenômeno de emissão de elétrons quando um metal é aquecido)

necessita de maior tensão para impulsionar um número suficiente de elétrons à corrente requerida. À medida que a corrente cresce, a temperatura do catodo aumenta, aumentando a facilidade de emissão termiônica. Com o aumento da corrente, o grau de ionização da região de queda catódica e da coluna do arco é progressivamente aumentado. Assim, além de uma maior superfície emissiva, tem-se um condutor elétrico mais robusto, tornando mais fácil a circulação de corrente. Isto significa uma tendência à diminuição da tensão.

Esta tendência de abaixamento da tensão com o aumento da corrente é equivalente a um efeito de auto-alimentação, pois menos potencial é necessário para carrear mais corrente. Diante de uma situação como esta, somente a colocação de um “freio” pode parar o aumento da corrente. Este “freio” é o que determina o uso de fontes de comando de corrente para controle do processo TIG (4).

Ainda na Figura 1 é possível verificar a variação da tensão do arco de acordo com o comprimento do mesmo. Os dois gráficos mostram que a tensão do arco, para determinado arranjo de corrente, gás de proteção e eletrodo, pode ser controlada a partir do comprimento do arco.

Em processos automatizados, o controle da tensão do arco é de fundamental importância para manter o processo estável. O controle é feito a partir de sistemas integrados aos manipuladores que promovem o controle da altura do arco a partir da leitura de tensão do mesmo. Estes sistemas são denominados AVC, do inglês, *Arc Voltage Control*. A necessidade do AVC se dá devido a imperfeições da junta a ser soldada, as quais variam Distância Eletrodo-Peça (DEP), consequentemente a tensão do arco. As técnicas de controle do AVC são fundamentais para o bom desempenho do equipamento.

Uma vez que, o eletrodo não é consumível, o processo TIG possibilita a soldagem sem adição de material. Neste caso, o processo é dito autógeno. Quando a junta a ser soldada exige a adição de material, por exemplo, juntas chanfradas, metal de adição pode ser adicionado manualmente ou por meios automatizados (5).

Nos processos TIG, quando necessária a alimentação de arame, o processo realizado manualmente apresenta baixos rendimentos quanto à produtividade por serem procedimentos lentos e com baixa taxa de deposição. Existem estudos datados da década de 1960, descrevendo ensaios com alimentação automática de arame que já buscavam maiores produtividades para o processo TIG (6). É possível encontrar casos em que a produtividade aumentou na ordem de 800% quando aplicado

alimentação automática comparada à manual, em se tratando dos tempos de soldagem (7).

Para alimentação automática de arame são necessários um cabeçote alimentador e um circuito de controle. As vertentes de pesquisa com alimentação automática se distinguem em arame frio (*cold wire*) e arame quente (*hot wire*) (6). Como o próprio nome diz, a diferença está na temperatura em que o arame é adicionado, sendo o arame quente, previamente aquecido por efeito joule ou outro métodos. A técnica de arame a frio o metal de adição é alimentado a temperatura ambiente. No escopo deste trabalho, apenas a técnica de arame frio será abrangida.

A soldagem TIG orbital com adição de arame a frio tem sido utilizada na indústria petroquímica em procedimentos de passe de raiz em tubulações de paredes espessas. Na indústria alimentícia, para união de tubos de aços inoxidáveis, a adição de arame frio, em alguns casos, também é presente (6).

Assim como na soldagem manual, onde cada soldador apresenta uma técnica de direcionamento, bem como a noção da região e quando deve realizar a alimentação do arame, em procedimentos mecanizados, a maneira com que o arame é alimentado à poça tem extrema importância para a estabilidade do processo.

Algumas variantes do processo TIG mecanizado aplicam alimentação tangencial ao arco, onde a região sobre a qual o arame é inserido ao processo apresenta elevadas temperaturas do arco voltaico. Neste processo, o ângulo de alimentação de arame tem a mesma ordem do ângulo de afiação do eletrodo. Outras variantes induzem um movimento oscilatório do arame de modo a promover agitações à poça de fusão, concatenando maiores taxas de fusão e melhores acabamentos.

Nos procedimentos com alimentação automática de arame, o metal de adição é fornecido na forma de bobinas, sendo as mesmas bobinas de arame eletrodo dos processos MIG/MAG. De todo modo, para que a alimentação seja efetuada, há a necessidade de um cabeçote alimentador e um condutite, bem como um sistema de direcionamento de arame à poça de fusão. Normalmente estes cabeçotes fazem parte do conjunto da fonte de soldagem, sendo controlado pela mesma. Em fontes multi-processos, é bastante comum a presença de programas TIG com alimentação de arame.

2.2 SOLDAGEM ORBITAL

2.2.1 Montagem e fabricação das dutovias terrestres (*onshore*) e subaquáticas (*offshore*)

Nesta seção serão descritos as etapas e a incumbências que englobam as obras de dutovias, sejam *onshore* ou *offshore*. O objetivo é apresentar e inserir o leitor ao contexto de trabalho.

As etapas concernentes à construções das tubulações são distintas para dutos terrestres e subaquáticos. A fabricação das linhas terrestres normalmente são obras de maiores impactos ambientais, devido à grandeza do projeto.

A primeira etapa dessas obras concerne à abertura da faixa de domínio. Esta faixa consiste no ambiente em que a obra será realizada, e deve ser grande o suficiente para a passagem de máquinas, e menor o possível para reduzir os impactos ambientais (8). Normalmente são faixas de 15 à 20 m de largura.

Após a abertura da faixa, faz-se a escavação da vala onde a tubulação será alocada, e distribuem-se os tubos a serem unidos ao longo da faixa. Os tubos normalmente têm comprimento de 12 m, podendo variar de acordo com o ambiente em que serão soldados.

Anteriormente às etapas de soldagem ocorrem as etapas de usinagem, montagem e alinhamentos dos tubos. Em procedimentos mecanizados, estas etapas são cruciais para o bom desempenho do processo, pois descontinuidades, tais como desnivelamentos e abertura de *gap* podem intervir na formação da raiz. A usinagem dos tubos é feito por máquinas biseladoras que chanfram as extremidades de acordo com uma geometria especificada. A montagem e o alinhamento são realizados, normalmente, por sistemas de acoplamento interno, onde se alinha um tubo com o seguinte. Os critérios de desnivelamento e abertura de *gap* são regidos segundo alguma norma.

Com a junta preparada, as etapas de soldagem ocorrem em cabines, onde são presentes os equipamentos de soldagem. Dependendo da espessura da tubulação, várias cabines são montadas, e cada uma é responsável por algumas camadas de solda, sendo a primeira delas, o passe de raiz e passe quente (passe de solda seguinte ao passe de raiz). A produtividade neste caso é regida então pela primeira cabine, a qual dita o andamento da obra.



Figura 2 - Construção de linhas dutoviárias terrestres. À esquerda: Faixa de domínio e distribuição dos tubos; à direita: Cabines de soldagem

Fonte: disponíveis em: www.corribgaspipeline.com e www.crc-evans.com

Em algumas situações, por exemplo, regiões alagadas, os tubos passam por uma etapa de concretagem. Trata-se de um revestimento em concreto para proteger a tubulação da oxidação, além de dar lastro para que a tubulação fique no leito da região alagada.

Já as tubulações *offshore*, a fabricação se dá de maneira diferenciada, podendo ser fabricado tanto em terra ou em alto mar. Quando fabricados em terra, as tubulações são soldadas, e à medida que isto ocorre, uma embarcação do tipo PLSV (*Pipe-Laying Support Vessel*) faz o bobinamento dos dutos. As estações de fabricação e bobinamento são chamadas em *SpoolBase*. As embarcações PLSV também são responsáveis pelo lançamento das tubulações ao mar.

Outra maneira se dá com a fabricação direta nas embarcações, e à medida que os tubos são soldados, já são lançados ao mar.



Figura 3 - Processos de fabricação de tubulações *Offshore*. Superior: *SpoolBase*; inferior: Embarcação com *line-up* de soldagem

Fonte: www.crc-evans.com

Nestas embarcações, é presente um pátio de tubos, onde são estocadas as partes a serem soldadas. Os tubos são então usinados e entram para o *line-up* de produção. Aqui, a linha segue continuamente em movimento, e à medida que os tubos são soldados, passam por inspeção, concretagem/revestimento e em seguida são lançados ao mar.

As demandas de produção *offshore* tem sido abundantes desde o início de exploração das camadas do Pré-sal. Só em 2014, a Petrobrás passou a contar com mais quatro embarcações PSLV, correspondendo 26% de uma frota com 19 embarcações do tipo, para a expansão das linhas *offshore* do país (1).

2.2.2 Processo de Soldagem Orbital

O processo de soldagem orbital caracteriza-se pelo tipo de movimento/trajetória realizado pela tocha e/ou peça. Neste caso, para o

movimento circunferencial, desloca-se o arco de maneira a orbitar a peça, ou se rotaciona a peça mantendo o arco estacionário. Procedimentos onde a tocha é mantida parada são denominados em inglês como *Stationary Welding*. Já os procedimentos em que a peça é mantida parada e a tocha é movimentada são encontrados como *Circular/Orbital/Girth Welding* (9). Em português é chamado apenas de procedimentos orbitais.

Na soldagem estacionária, diversos processos de soldagem podem ser aplicados, desde eletrodos revestidos a processos plasma, sendo bastante comum também o emprego do processo arco submerso, principalmente em tanques e vasos de pressão.

Em algumas aplicações, devido à impossibilidade de rotação da peça, há a necessidade de um sistema orbital, isto é, cabeçotes que façam a soldagem circunferencial da tubulação, exigindo então, procedimentos/processos aplicáveis a todas as posições de soldagem. (10). Por exemplo, processo à arco submerso não é aplicado em procedimentos fora de posição devido ao fluxo, exceto algumas aplicação muito específicas. Já processos MIG/MAG, Eletrodo Revestido e TIG podem ser aplicados em todas as posições. Estes processos são mais comumente utilizados em soldagem orbital e já são bastante difundidos na indústria petroquímica, naval e alimentícia (11).

Difundido principalmente pela qualidade das juntas e pela versatilidade, aplicações orbitais com processos TIG vêm sendo cada vez mais utilizadas. Em tubulações com espessura de parede na ordem 1 à 2,5 mm, este processo já é bastante utilizado, apresentando grande repercussão na indústria alimentícia. Na soldagem de tubulações de grandes diâmetros (*pipelines*), o processo orbital automatizado tem sido bastante aplicado na soldagem da raiz e do passe quente, procedimento necessário logo após o passe de raiz para conferir propriedades mecânicas ao passe anterior (10).

Devido ao melhor controle de aporte térmico, o processo TIG possibilita melhores controles sobre os efeitos metalúrgicos que ocorrem no metal de base (10). Por esta razão, os processos TIG vêm sendo utilizados na soldagem de ligas de aço inoxidáveis, tais como aços inoxidáveis martensíticos, austeníticos e Duplex (austeno-ferríticos) (12). Quando submetidos a grandes variações de temperatura, caso decorrente de procedimentos de soldagem, estas ligas estão sujeitas a transformações que afetam a resistência mecânica e à corrosão, tais como, alteração da composição química e alteração na microestrutura (13). Estes detalhes vêm sendo estudados, e revelam que o processo TIG orbital apresenta viabilidade econômica quando aplicado em todo o

procedimento de junta, ou seja, passe de raiz, preenchimento e acabamento. Um exemplo disto foi utilização do processo TIG orbital no lugar de arco submerso para a construção da planta nuclear Angra II em Angra dos Reis - RJ, na soldagem de aços inoxidáveis AISI 347. Efeitos de micro trincas foram eliminados devido um melhor controle de aporte térmico (14).

Atualmente, o estado da arte da tecnologia orbital esta no ramo da indústria petroquímica. As crescentes demandas exigem que a construção de *pipelines* seja cada vez mais rápida e robusta. Diversos fabricantes de equipamentos disponibilizam variados sistemas orbitais, cada um com sua particularidade. Na seção seguinte serão descritos os equipamentos para soldagem TIG orbital.

2.2.3 Equipamentos TIG orbital

A soldagem orbital não é tecnologia recente. As primeiras aplicações de soldagem orbital foram na união de dutos há mais de 50 anos (15). As necessidades de aplicações orbitais foram surgindo à medida que as demandas foram crescendo, exigindo então, maiores produtividades na soldagem de tubulações.

A soldagem orbital pode ser dividida de acordo com os sistemas existentes, sendo eles cabeçotes de câmara fechada, e cabeçotes de câmara aberta. Estes se distinguem devido ao tamanho (diâmetro e espessura de parede) da tubulação a ser soldadas.

O cabeçote de câmara fechada foi visto pela primeira vez na década de 1960, onde um grupo de engenheiros desenvolveu um equipamento em que o eletrodo de tungstênio rotacionava em volta ao tubo (16).

Estes cabeçotes possuem um sistema de fixação e alinhamento dos tubos, que quando fechados, criam um ambiente que enclausura toda a região a ser soldada. Este ambiente onde ocorre a soldagem é totalmente preenchido com gás inerte de modo a proteger a poça de fusão e o eletrodo. Este tipo de cabeçote orbital é normalmente utilizado em tubos com diâmetro externo de 2 mm a 170 mm e espessura de parede de até 4 mm (17).

Ademais, estes equipamentos são utilizados quando não há necessidade de metal de adição, nem controle de tensão do arco. Neste caso, a distância entre o eletrodo e a peça é mantida fixa (16) (17). Isto ocorre, pois a variação do comprimento do arco é muito menor devido ao bom alinhamento entre as peças e a ovalização é reduzida.

Na soldagem de ligas de aços inoxidáveis existe a necessidade de proteger a superfície interna da solda, devido às reações de oxidação e formação de carbonetos. Para evitar tais reações deve ser utilizado um gás inerte internamente ao tubo (gás de purga), promovendo então a proteção da superfície interna da solda (18).



Figura 4 - Cabeçotes de câmara fechada. Fabricantes: à esquerda: SPS - Soluções para Soldagem; à direita: Arc Machines Inc.

Fonte: disponíveis em www.sps-soldagem.com.br e www.arcmachines.com

Quando os tubos a serem soldados apresentam diâmetros maiores que 170 mm, e/ou espessura de parede acima de 4,0 mm, ou quando a junta requer adição de material, a alternativa atual são os cabeçotes de câmara aberta (16) (9).

Nestes equipamentos, o sistema desloca-se num trilho/guia montado sobre a tubulação. Para evitar possíveis variações da tensão do arco, oriundas das deformações dos tubos a serem soldados, normalmente estes equipamentos são dotados do sistema de controle de tensão de arco, AVC, o qual está integrado com o eixo perpendicular à superfície do tubo, atuando então no sentido de aproximar ou afastar o eletrodo da peça. Estes sistemas proporcionam uma correção automática do comprimento do arco por meio da leitura da tensão do mesmo, mantendo-a estável durante a operação, como citado anteriormente.

Além do eixo integrado ao AVC, os cabeçotes apresentam também o eixo de deslocamento em torno do tubo e o eixo de deslocamento longitudinal ao tubo, o qual é responsável pelo movimento oscilatório do eletrodo. Alguns cabeçotes apresentam, além dos eixos principais acima citados, um eixo a mais que atua na regulagem do ângulo de ataque do eletrodo em relação à peça. Normalmente estes eixos rotacionais são regulados manualmente antes de operação, porém podem apresentar motores e controles eletrônicos possibilitando ajuste *online*, isto é, durante a operação.



Figura 5 - Cabeçotes de câmara aberta. Fabricantes a: Arc Machines Inc.; b: SPS - Soluções para Soldagem; c: Magnatech.

Fonte: disponíveis em: www.arcmachines.com, www.sps-soldagem.com.br e www.magnatechllc.com

Como mostra a Figura 5, a imagem a direita apresenta um cabeçote ao qual a bobina de metal de adição e a tocha de soldagem já estão acopladas ao equipamento orbital. Quando o cabeçote apresenta todos os sistemas (deslocamento, AVC, tocha de soldagem e alimentador de arame) são ditos de função completa (do inglês, *full function*). Já o equipamento ao meio deve ser acoplada uma tocha por meio de um suporte adequado, sendo então necessário um sistema de alimentação de arame paralelo, normalmente acoplado à fonte de soldagem.

Uma vantagem de equipamentos que possibilitam a adaptação de diferentes tochas de soldagem a partir de um suporte adequado, é que estes podem ser utilizados, por exemplo, tanto para processos TIG como para MIG/MAG. Quando para TIG, deve se ter também o direcionador de arame, o qual é responsável pela posição do arame em relação à poça de fusão.

Outra função de grande valia nos equipamentos é a possibilidade de deslocamento em ambas as direções (horária e anti-horária). Uma vez que, a união é realizada em varias camadas de solda, numa direção só, ao final do procedimento o mangote encontra-se envolto ao tubo. Neste caso, a cada passe, o operador deve voltar o cabeçote para “desenrolar” o mangote. Quando é possível a soldagem em ambas as direções, um passe vai, e o outro volta, evitando assim, tempos mortos. Geralmente os cabeçotes que permitem isso apresentam dois direcionadores de arame, um para cada lado do eletrodo.

2.3 SOLDAGEM DE PASSE DE RAIZ

A soldagem de tubulações e/ou chapas espessas, presentes na indústria naval e petroquímica, exigem procedimentos específicos que resultem em uma união de qualidade. Os procedimentos normalmente demandam dois ou mais passes para o fechamento completo da junta. Estes passes são nomeados de passe de raiz, passes de preenchimentos e passes de acabamento (Figura 6).

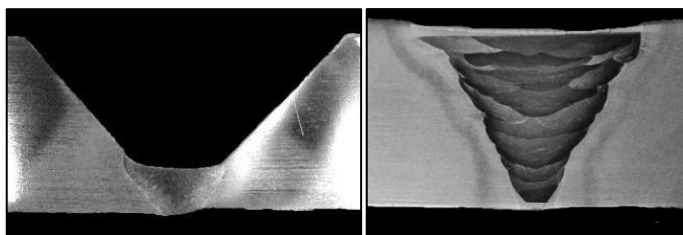


Figura 6 – À esquerda: Passe de Raiz; à direita: Junta preenchida. Espessura de parede: 19,05 mm (3/4")

Dentre os passes presentes, o passe de raiz, primeiro passe na união de peças espessas, tem fundamental importância estrutural e deve ser executado minuciosamente. Em alguns casos o passe de raiz chega a suportar toda a tubulação, de modo que a produção da junta seguinte possa ser iniciada antes mesmo que a anterior seja finalizada. Mas nem todos os processos são capazes de garantir um reforço mínimo o suficiente para isto. Normalmente, com processos convencionais, o reforço da raiz é da ordem de 3,0 mm à 4,0 mm, porém existem novas tecnologias que possibilitam reforços maiores (19).

O procedimento de passe de raiz segue critérios bastante exigentes pelas normas, e muitas vezes, além delas, devem atender as demandas do projeto e/ou cliente, que muitas vezes, estreitam ainda mais os critérios normatizados.

Em sendo um cordão crítico, o passe de raiz normalmente é efetuado manualmente de modo a conferir penetração total ao longo da junta, bem como reforço suficiente. Assim sendo, este procedimento acaba por ser um gargalo nas linhas de produção, pois demanda mais tempo para execução.

A busca por processos e procedimento que confirmem melhores produtividades é o foco da pesquisa em soldagem orbital. Ademais,

busca-se repetitividade, o que garante procedimentos bem especificados e com qualidade definida.

Diversos fabricantes de equipamentos, tanto das fontes de soldagem quanto dos cabeçotes, apresentam suas variantes de algum processo específico, ou novas técnicas de soldagem. Algumas variantes do processo MIG/MAG, processos a LASER e técnicas avançadas do processo TIG (*Key hole*), vêm sendo estudadas e, em alguns casos, aplicadas, de modo a propiciar maiores produtividades, pois estas podem efetuar passes com elevadas velocidades de soldagem e permitem a redução do tamanho da junta a ser soldada (20). Porém, além da produtividade do processo, a soldagem orbital engloba outros fatores, os quais podem ser otimizados tais como geometria da junta, procedimentos em 360°, misturas gasosas ditas “mais produtivas”, etc.

Em se tratando da junta, nos procedimento de soldagem orbital de paredes espessas, as extremidades dos tubos são preparadas, de modo a conferir uma melhor geometria para a realização dos procedimentos. A etapa de preparação concerne à usinagem dos biseis, promovendo um perfil de junta mais adequado para a soldagem. Diversas geometrias de chanfros são utilizadas de acordo com a especificação do procedimento, sendo as mais comuns os chanfros do tipo “V” e “U”, embora alguns procedimentos utilizem chanfros especiais.

Em procedimentos manuais, o tipo de junta comumente aplicado é do tipo “V” (Figura 6) com espaçamento entre as peças (*gap*). O tipo de chanfro em “V” confere maior abertura de topo e permite fácil acesso ao soldador (21). Além disso, a presença do *gap* garante que a penetração da solda seja total no passe de raiz. Porém, com ângulos acentuados e abertura de *gap*, o volume de material a ser preenchido é bastante alto, exigindo mais passes por camada de solda.

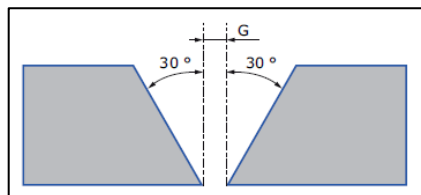


Figura 7 - Chanfro em V comumente utilizados em procedimentos manuais. Adaptado de (21)

Já em procedimentos mecanizados, uma vez que, as tochas projetadas apresentam tamanhos reduzidos, a geometria dos biseis podem ser menores (ângulos mais fechados). Neste caso, o chanfro

recomendado para aplicações mecanizadas é mostrado na Figura 8 (Junta do tipo “U” com ou sem espaçamento entre as peças).

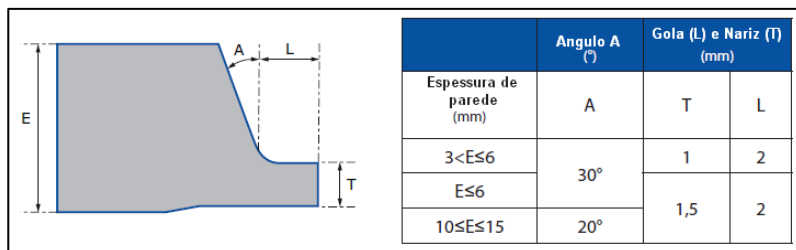


Figura 8 - Chanfro recomendado para soldagem orbital mecanizada. Adaptado de (21)

O chanfro “U” apresenta algumas vantagens em relação ao tipo “V”. Primeiramente, para paredes acima de 10mm, o volume da junta é reduzido, permitindo o enchimento da junta com menor número de passes. Ademais, a redução do volume concerne em redução de gastos com tempo de preparação, metal de adição e tempo de soldagem, o que, em fatores econômicos, são fundamentais.

Em alguns casos, a junta apresenta ângulo de abertura bastante fechado (na ordem de 5°), os quais caracterizam a soldagem conhecida pelo nome, em inglês, *Narrow Gap*. Neste caso, as tochas apresentam uma concepção diferente das usuais, pois o acesso a essas juntas é bastante restrito. Alguns equipamentos disponíveis no mercado permitem a soldagem de chanfros com espessuras de até 300 mm com aberturas próximas à 13 mm (22).

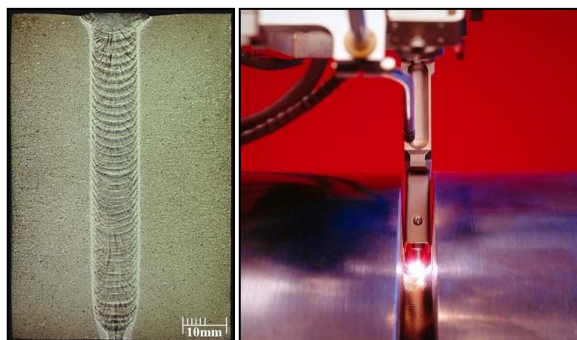


Figura 9 - Soldagem Orbital com chanfro *NarrowGap* (22). À esquerda: Seção metalográfica da junta; à direita: equipamento para soldagem *NarrowGap*
 Fonte: disponível em: www.arcmachines.com

Em procedimentos mecanizados, quando a junta apresenta espaçamento entre as peças (*gap*), na maioria dos casos faz-se o uso de cobre-junta (*backing*) durante o passe de raiz. Este dispositivo é posicionado ao lado interno da tubulação, rente à parede do tubo. Seu objetivo é sustentar a poça de fusão e evitar um defeito conhecido como *BurnThrough*, além de permitir elevadas taxas de deposição. Este equipamento é utilizado principalmente em processo MIG/MAG. Brüggemann (23) realizou procedimentos de passes de raiz com MIG/MAG convencional com velocidades de arame e soldagem na ordem de 9 m/min e 0,95 m/min, respectivamente. A junta utilizada nos ensaios foi de chanfro “U” com *gap* 2 mm.

Embora o uso de *backing* permita maiores produtividades, em alguns países seu uso é proibido devido ao risco de inclusões de cobre no cordão de solda. Neste caso, é permitido apenas *backings* cerâmicos. Dentro deste contexto, o processo TIG tem uma vantagem, pois o espaçamento entre as peças pode não é presente, o que despreza o uso de cobre-junta além de reduzir ainda mais o volume da junta. Algumas variantes do processo MIG/MAG também permitem passes sem o uso de *backing*, são os casos das variantes STT (*Surface Tension Transfer* – Linconl Electrics) e CCC (Curto Circuito Controlado – IMC Soldagem). Em critérios financeiros, fabricantes de sistemas de acoplamento internos permitem a opção com ou sem *backing*, sendo a segunda opção, na ordem de 40 % mais barata.

Em se tratando da sanidade da raiz, existem diversas normas que regem critérios de aceitação para os procedimentos de soldagem. No caso de dutos e tubulações pode-se destacar três delas: API 1104 (dutos *onshore*), ASME B 31.3 (tubulações) e DNV-OS-F101 (dutos *offshore*). Dentre os critérios de aceitação, alguns podem ser detectados visualmente quando existe acesso à raiz, caso contrário, devem ser realizados ensaios não destrutivos para qualificar o procedimento.

No escopo deste trabalho, a qualificação dos procedimentos foi feita por inspeção visual e metalográficos a partir dos critérios de aceitação da norma API 1104 20ª Ed. (2005) seção 9 (*Acceptance Standards for Nondestructive Testing* – Normas de Aceitação Para Ensaios Não Destrutivos) (24). Dentre eles, podem ser citados:

- **Penetração incompleta sem presença de desnivelamento (*high-low*)**

É considerado defeito quando:

- O comprimento da região sem penetração excede 25 mm;

- num comprimento total de 300 mm de solda, a soma das regiões sem penetração exceder 25 mm;
- em soldas com comprimentos menores que 300 mm, a soma das regiões sem penetração exceder 8 % do comprimento do cordão.

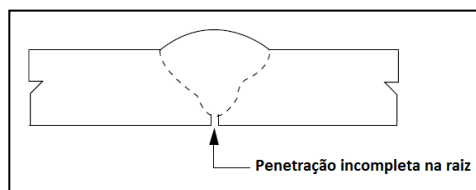


Figura 10 - Penetração incompleta na raiz. Adaptado de (24)

- **Penetração incompleta com presença de desnivelamento (*high-low*)**

É considerado defeito quando:

- O comprimento da região sem penetração exceder 50 mm;
- num comprimento total de 300 mm de solda, a soma das regiões sem penetração exceder 75 mm;

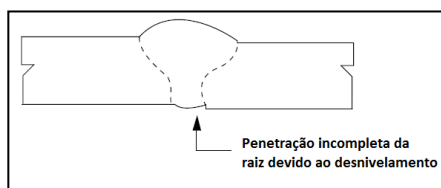


Figura 11 - Penetração incompleta devido à presença de desnivelamento. Adaptado de (24).

- **Concavidade da raiz e *burn-through***

Os critérios de concavidade de raiz são para ensaios radiográficos. Qualquer comprimento de concavidade da raiz é aceitável desde que a densidade da imagem na região com concavidade não exceda a densidade da região mais fina adjacente. Caso isto ocorra os critérios são definidos pelo defeito de *burn-through*, que são:

- se a dimensão máxima exceder 6 mm e a densidade da imagem em qualquer região do defeito exceder a da região mais fina adjacente;

- se a máxima dimensão exceder a espessura de parede nominal, e a densidade da imagem em qualquer região do defeito exceder a da região mais fina adjacente;

- num comprimento de 300 mm de solda, a soma das dimensões das descontinuidades as quais a densidade de imagem excederam a da região mais fina adjacente, exceder 13 mm.

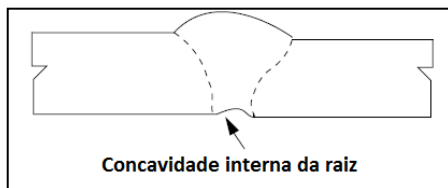


Figura 12 - Concavidade da raiz. Adaptado de (24).

A fim de definir um valor numérico para a concavidade da raiz, fez-se a seguinte reflexão. A mesma norma diz que para o passe de acabamento, o reforço não deve exceder 1,6 mm (seção 7.9.2). Para que a densidade da imagem não exceda a da região adjacente, a solda deve conter uma espessura maior ou igual à espessura da parede do tubo. Assim sendo, a concavidade de raiz pode ser compensada pelo passe de acabamento em até 1,6mm, sendo este o limite máximo aceitável.

A norma API1104 não define valores para o reforço da raiz. Neste caso buscou-se a norma DNV-OD-F101 *Offshore Standard*, 2012 (25), pois esta define os critérios de aceitabilidade em valores métricos, que é:

- reforço de raiz não deve exceder $0.2e$, onde “e” é espessura da parede, ou máximo de 4,0 mm. Para os tubos utilizados neste trabalho, cuja espessura é de 12,7 mm, o reforço máximo aceitável é de 2,5 mm.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os equipamentos utilizados, os processos de confecção dos corpos de prova, bem como a metodologia aplicada para realização dos ensaios.

3.1 BANCADA DE ENSAIOS E CONSUMÍVEIS

Para a realização dos ensaios a bancada montada foi constituída por uma fonte de soldagem; um cabeçote alimentador de arame; uma unidade de refrigeração para a tocha de soldagem; uma tubulação estandar para fixação dos corpos de prova e da cinta orbital; um cabeçote orbital; e um sistema de aquisição de dados.

A fonte utilizada foi o modelo Digiplus A7 do fabricante IMC. Trata-se de uma fonte multiprocessos (MIG/MAG, TIG, Plasma, Eletrodo Revestido e Arco Submerso) operável na faixa de corrente entre 5 e 450 A. Em 100 % de fator de carga, a fonte pode operar em 280 A. Para o processo TIG, a fonte permite soldagem em corrente alternada, pulsada e constante com alimentação de arame nos modos alternado e pulsado.

O cabeçote alimentador de arame utilizado para os ensaios foi o STA-TIG do mesmo fabricante (IMC) e permite regulagens de velocidade de alimentação na faixa entre 0,2 e 7,0 m/min. O cabeçote possui total integração com a fonte e é comandado pela mesma.

Como sistema de refrigeração de tocha foi utilizada uma unidade de refrigeração do fabricante IMC modelo UPR7500 com vazão máxima de 10 l/min. O sistema de refrigeração é independente da fonte e do cabeçote alimentador, podendo ser utilizado para outros fins além de refrigeração de tochas de soldagem.

O sistema orbital utilizado foi o Tartflope V4 do fabricante SPS, adaptado para o processo TIG. Neste caso, o 4º eixo (eixo angular) foi retirado devido a não necessidade. Sendo assim, o cabeçote apresenta 3 eixos de deslocamento (X, Y e Z) e pode ser programado para realizar trajetórias lineares e com tecimento. Além do cabeçote, o sistema apresenta uma unidade de controle e uma IHM (Interface Homem Máquina) para programação e posicionamento.

Para aquisição de dados foi utilizado o Sistema de Aquisição Portátil – SAP, do fabricante IMC. O sistema faz aquisição de sinais de corrente, tensão, vazão de gás e velocidade de arame em uma frequência de 5000 Hz. Os dados aquisitados são dispostos em formas de gráficos e histogramas, permitindo uma análise detalhada do procedimento

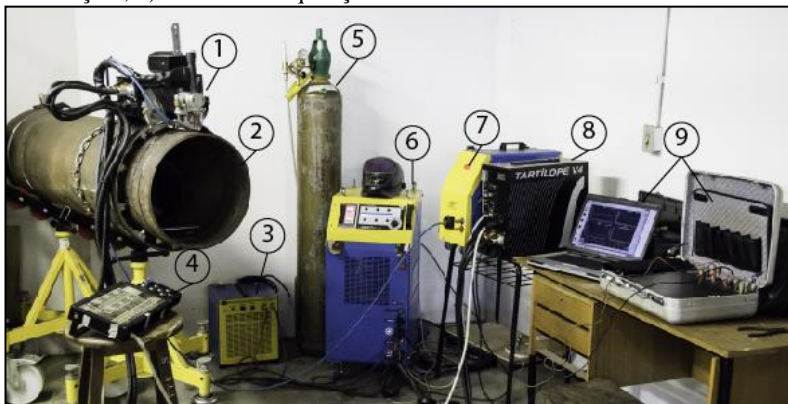
realizado. Além disto, podem ser analisados trechos específicos independentemente dos demais pontos aquisitados, o que permite uma análise pontual de algum evento ocorrido.

A tocha de soldagem utilizada foi o modelo AUT-WIG 400 W, do fabricante ABICOR BINZEL. Este modelo tem capacidade para correntes de até 400A, suporta eletrodos de 0,5 à 4,0 mm e é refrigerada à água.

Como consumíveis, o gás de proteção utilizado foi argônio puro (99,99 % de pureza), e como metal de adição, foi utilizada uma bobina de arame AWS ER70S-6 com 1,0 mm de diâmetro. O eletrodo adotado foi o de tungstênio dopado com cério (AWS EWCe-2) com diâmetro de 3,2 mm.

A imagem seguinte mostra a bancada de ensaios completa.

Figura 13- Bancada de ensaios: 1) Cabeçote orbital; 2) Tubulação estande; 3) Unidade de refrigeração; 4) IHM do cabeçote; 5) Cilindro de gás de proteção; 6) Fonte de soldagem; 7) Cabeçote alimentador de arame; 8) Unidade de controle do cabeçote; 9) Sistema de aquisição de dados.



3.2 CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados para soldagem orbital foram “anéis” de tubulações de aço SAE 1020, com diâmetro nominal de 16” (406,4 mm) e espessura de parede de 1/2” (12,7 mm). Os anéis foram cortados com comprimentos de aproximadamente 70 mm a partir de um tubo maior.

A preparação dos corpos de prova exigiu etapas de corte, usinagem e soldagem. Para corte dos anéis foi utilizado processo de corte plasma (Figura 14). Para isso, foi adaptada uma bancada

constituída de uma mesa rotativa e um suporte de tocha. O corte foi executado com a tocha permanecendo estática e o tubo girando. Desta maneira foi possível realizar um corte de bom acabamento, o que facilitou os procedimentos de usinagem posteriores.



Figura 14 – Bancada para corte dos tubos

Para a etapa de usinagem, a infra-estrutura do laboratório contava com uma biseladora/chanfradeira hidráulica da marca PROTEM, modelo US150 (Figura 15). As ferramentas disponíveis permitiam a usinagem de biseis em V 30°, V 15° e em J 12,5°. No trabalho foram adotados biseis em V com 15° e em J com 12,5°.



Figura 15 – Biseladora Protem US150

Vale ressaltar aqui que a metodologia de usinagem influenciou diretamente nos resultados dos ensaios de soldagem. O processo de adoçamento (usinagem do diâmetro interno), aplicado aos primeiros corpos de prova, influenciava na geometria da junta, o que acarretou em resultados diferenciados. A influência do adoçamento será comentada na 4.2.1.3. Como solução, adquiriu-se um dispositivo que compensa a ovalização dos tubos, excluindo necessidade de realizar o adoçamento dos tubos. O dispositivo é chamado pelo nome em inglês *ID-Tracker* e será comentado mais adiante.

O chanfro adotado como padrão foi o do tipo J com face de raiz (“nariz”) de 2mm e abertura superior (*top gap*) de 13mm (Figura 16). Esta geometria foi definida a partir de recomendações extraídas de um manual técnico de soldagem TIG orbital do fabricante de equipamentos POLYSOUDE (21).

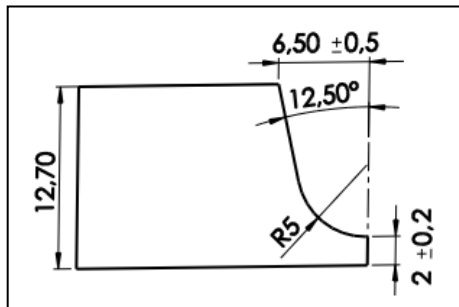


Figura 16 - Chanfro “J” padrão dos ensaios de soldagem

Com os anéis cortados e usinados, a montagem dos copos de prova se dava já na bancada de ensaios por intermédio de um alinhador externo de tubulações (Figura 17). Primeiramente alinha-se e solda-se o primeiro anel à tubulação da bancada. Em seguida alinha-se o segundo anel em relação ao primeiro. Para fixação, foram dados pontos de solda permanentes (parte do passe de raiz) sem metal de adição. Os pontos de solda não interferiram nos ensaios.

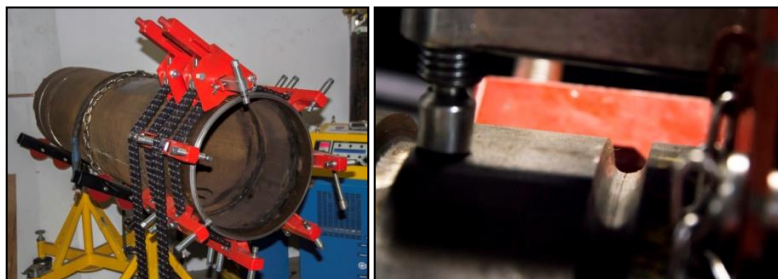


Figura 17- À esquerda: Alinhador externo de tubulação; à direita: Junta alinhada

Com o dispositivo de alinhamento, os corpos de prova ficam livres de descontinuidades tais como desnivelamento (*high-low*) e *gap*, embora em alguns casos o *gap* não é visto como descontinuidade.

3.3 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida neste trabalho foi dividida em duas frentes, sendo uma delas relacionada ao desenvolvimento do equipamento e outra para ensaios orbitais.

A parte de desenvolvimento de equipamento concerne tudo que foi projetado, aprimorado e implementado nos equipamentos como fonte de soldagem e cabeçote orbital.

Nesta primeira parte do trabalho foram desenvolvidos métodos de controle do AVC para correntes pulsadas; implementação de um programa para soldagem TIG orbital na fonte de soldagem; projeto de dispositivos do cabeçote orbital tais como alimentadores de arame e suporte de tocha; e sincronização entre fonte de soldagem e cabeçote orbital.

Nesta etapa foi utilizado *software* KEIL para programação da fonte de soldagem e cabeçote orbital, cuja linguagem de programação é em C/C++. Para projetos mecânicos foi utilizado o *software* SolidWorks de modelagem 3D em CAD (*Compter-Aided Design*).

A segunda parte do trabalho concerne os ensaios orbitais, onde foram avaliados os fatores que influenciam a soldagem orbital, a fim de compreender a problemática e propor soluções e metodologia de procedimentos para a soldagem TIG orbital.

Primeiramente distinguiram-se as seções do corpo de prova que definem as posições de soldagem. São elas: Posição Plana (PP); Vertical Descendente (VD); Sobre Cabeça (SC); e Vertical Ascendente (VA). Em soldagem orbital é comum referenciar as posições de acordo com as horas de um relógio de ponteiros. Assim sendo, as posições definidas estão dispostas da maneira representada pela Figura 18.

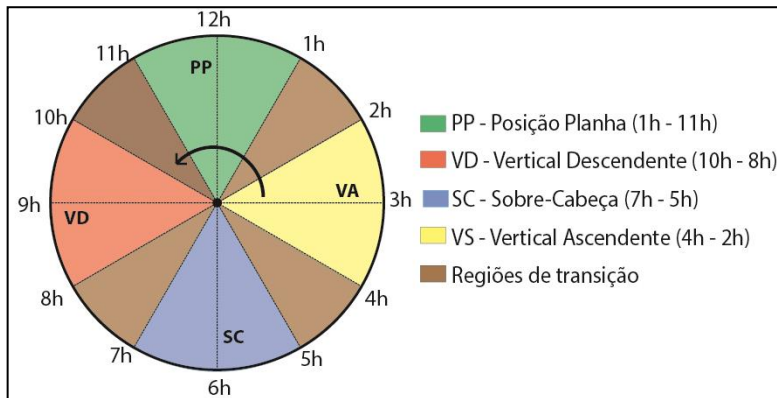


Figura 18 – Representação das posições de soldagem orbital

Vale mencionar aqui que as regiões de transição não foram definidas em primeira instância. Estas foram determinadas a partir de resultados obtidos nos ensaios orbitais, mas optou-se por representá-las neste momento. Outra questão que vale ressaltar é que os ensaios foram executados sempre no sentido anti-horário devido ao melhor arranjo da bancada de ensaios (melhor disposição de cabos, conduítes, etc.). Desse modo, o leitor verá que os gráficos mostrados neste trabalho apresentam o eixo das abscissas iniciado em 1h seguido se 12h, 11h e assim por diante.

Com as posições determinadas iniciaram-se os ensaios orbitais. Primeiramente, a partir de um ensaio preliminar, definiram-se parâmetros que conferissem uma raiz com penetração total na posição plana. A partir deste resultado, fez-se uma soldagem em 360° com a mesma parametrização nas demais posições, salvo pequenos ajustes durante a execução do procedimento.

A partir dos resultados obtidos nestes primeiros ensaios, corpos de prova foram destinados para adequar os parâmetros nas posições onde o resultado do cordão não tivesse sido bom. Os critérios de sanidade da raiz se basearam em fatores principalmente, geométricos. O objetivo era avaliar metodologias que conferissem uma raiz sã com geometria uniforme em todas as posições.

Encontrados os parâmetros adequados para cada posição, um corpo de prova foi soldado fazendo a variação dos parâmetros de acordo com as posições de soldagem.

Além da adequação de parâmetros para uma soldagem orbital em 360°, foram executados experimentos para avaliar a influência da metodologia de alimentação de arame. Para isto foram executados ensaios sobre a superfície do tubo, bem como em juntas chanfradas. Nestes ensaios foram avaliadas a influência do ângulo de alimentação e da posição (traz ou frente) de alimentação.

Paralelamente aos ensaios planejados, uma série de observações foram efetuadas de modo a complementar o entendimento da problemática e propor soluções para a soldagem orbital. As observações concernem sobre desempenho, robustez e operabilidade dos equipamentos, bem como da própria metodologia aplicada para a soldagem dos corpos de prova.

As amostras metalográficas foram preparadas a partir de um corte transversal ao cordão de solda passando por processo de lixação com lixas de granulação 80, 320, 400, 600 e 1200. Para destacar a zona fundida e termicamente afetada foi feito um ataque químico com reagente Nital 5 % (95 % álcool etílico absoluto e 5 % ácido nítrico nas proporções em volume).

Os cordões foram avaliados segundo critérios de estabilidade de processo, acabamento e geometria da seção soldada. O *software* utilizado para análise das macrografias foi o Adobe PhotoShop, que permite a medição de áreas e dimensões lineares.

Para melhor gerenciamento dos corpos de prova, estes foram nomeados de acordo com o chanfro utilizado e o número de execução, por exemplo, CPJ01 significa Corpo de Prova com chanfro J com número de execução 01. Todos os ensaios e resultados serão descritos detalhadamente nas seções seguintes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 OTIMIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

4.1.1 AVC e Sincronismo – Aprimoramento do método controle da altura do arco para processos em corrente pulsada

Para que a soldagem TIG Orbital mecanizada/automatizada seja eficaz, o controle da altura do arco e/ou tensão do mesmo, deve ser efetuado por intermédio do AVC. O controle da tensão é feito a partir da variação da DEP, uma vez que, para uma dada parametrização (corrente, diâmetro de eletrodo, gás de proteção, etc.) a tensão do arco varia com sua altura/comprimento (vide Figura 1).

A partir de uma tensão de referência regulada, o controlador faz constantes leituras da tensão do arco, e atua no eixo Z do cabeçote (eixo perpendicular à peça) no sentido de aproximar ou afastar o eletrodo da peça, fazendo com que a tensão do arco seja corrigida.

Os parâmetros de controle do AVC são:

- Tensão de Referência (Uref): tensão a qual o AVC deve tomar como referencia para atuar;
- Zona Morta (Zm): Intervalo de tensão onde o controlador não atua. O intervalo é dado pela tensão de referência mais ou menos, o valor regulado em Zm;
- Coeficiente de Correção (Kp): Coeficiente que altera a velocidade de correção do AVC. Kp's elevados aumentam a dinâmica da correção, isto é, a resposta é mais rápida.

A leitura da tensão é realizada a uma frequência de 1000 Hz e a correção é efetuada a uma frequência de 10 Hz, a partir da média das últimas 1000 leituras.

Este método de controle é bastante eficaz quando aplicado em corrente constante, porém apresenta limitações quando aplicado em procedimentos de corrente pulsada, pois a tensão de referência regulada é apenas uma, e, em procedimentos pulsados, a tensão varia de acordo com a corrente. Neste caso, o AVC atua todo momento, fazendo com que o arco oscile para manter a tensão estável.

Nas secções seguintes será descrito como foi feita a alteração do AVC para que fosse possível aplicar um controle da tensão em procedimentos pulsados.

4.1.1.1 Controle feito a partir de uma única tensão de referência

Primeiramente, o AVC permitia regular apenas uma tensão de referência. De acordo com o comportamento estático do processo TIG, representado na Figura 19, para uma mesma DEP, uma variação da corrente acaba alterando a tensão do arco.

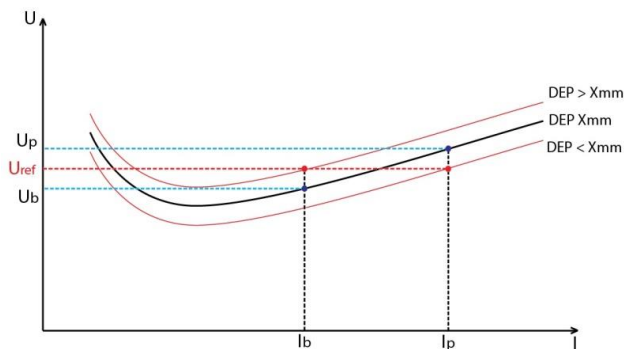


Figura 19 – Representação da curva estática TIG para diferentes DEP. Variação da Tensão de acordo com a variação da corrente de soldagem

Como mostrado, em uma dada DEP “x”, se for tomada como referência a tensão intermediária às tensões correspondentes à corrente de pulso (I_p) e base (I_b), ora a tensão do arco estará acima de U_{ref} (período de pulso), ora estará abaixo (período de base). Neste caso, atuação do AVC a partir de U_{ref} fará com que o comprimento do arco diminua no intervalo do pulso, e aumente no intervalo da base, caracterizando um movimento oscilatório.

O oscilograma apresentado na Figura 20 mostra o comportamento da tensão quando se utiliza uma tensão de referência média para um procedimento em corrente pulsada.

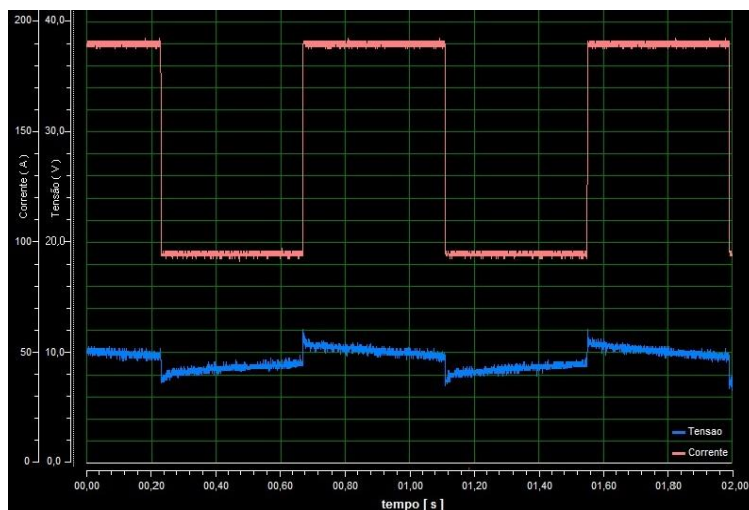


Figura 20 – Oscilograma de tensão e corrente com controle de tensão a partir de uma única referência

O procedimento foi realizado sobre a superfície de um dos anéis de tubulação e os parâmetros utilizados são mostrados na tabela seguinte.

Tabela 1 – Parâmetros de soldagem do ensaio com controle de corrente a partir de uma tensão de referência

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de Soldagem (Pulso/Base)	A	190/90
Tempo de Pulso/Base	s	0,4/0,4
Velocidade de Soldagem	cm/min	8
Tensão AVC	V	9,3V

Note que na Figura 20, a tensão varia sempre no sentido de estabilizar-se em 9,3 V, tensão de referencia utilizada. No período de pulso, a tensão inicia pouco acima de 10,0 V e na base próximo à 8,0 V. Este valores não são referentes aos picos de tensão existentes logo no início de cada fase, o qual é chamado de *overshot* (21) . Assim como descrito anteriormente, o AVC atua no sentido de encurtar o arco no período de pulso, caracterizando a rampa descendente da tensão durante esta fase, e, alongar o arco no período de base, fase onde a curva é ascendente.

Em alguns quadros retirados a partir de um vídeo, mostrados na Figura 21, foi medido a variação da DEP entre um período de pulso e base do processo representado pelo oscilograma da Figura 20. A variação da DEP é da ordem de 1,3 mm.

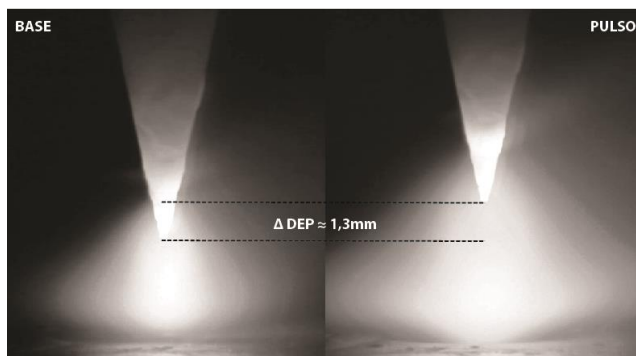


Figura 21- Variação da DEP entre pulso e base no ensaio com controle do AVC a partir de uma tensão de referência média

A variação representada na Figura 21 mostra o intervalo máximo da DEP, isto é, o momento mais afastado e o mais próximo da peça. Em outras imagens geradas, discriminou-se o pulso da base, e a DEP varia na ordem de 0,8 mm em cada período.

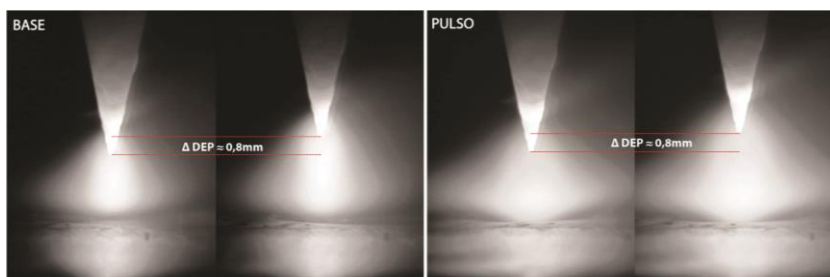


Figura 22 – Variação da DEP no período de base (esquerda) e período de pulso (direita) no ensaio com controle do AVC a partir de uma tensão de referência

A variação do comprimento do arco pode vir a acarretar em alguns fatores determinantes para o processo TIG. A variação da DEP influencia na pressão imposta pelo jato plasma, na potência do arco bem como sua eficiência.

Segundo Fan *et al* (26), para correntes de soldagem da ordem de até 200 A, a pressão do arco é bastante influenciada pelo comprimento

do mesmo, sendo assim, variações na DEP podem acarretar grandes variações na pressão do arco. A variação de 0,8 mm, como mostrada na Figura 22, acarreta em uma variação de aproximadamente 200 Pa para um arco de 200 A, corrente esta, próxima da utilizada no ensaio. Este valor corresponde aproximadamente 13 % da ordem de pressão para um arco de 3 mm em 200 A, que gira na faixa de 1500 Pa (26), mostrando-se um valor considerável.

Além da pressão do jato plasma, a variação da DEP resulta em consequências na alimentação do arame. Uma vez que, o direcionador de arame é fixado à tocha de soldagem, a variação do comprimento do arco muda a posição em que o arame entra na poça de fusão/arco, pois a distância Eletrodo-Arame (DEA) é sempre a mesma (Figura 23). Mantendo o mesmo ângulo de alimentação, para maiores DEP a entrada do arame se dá no arco. Para comprimentos menores, o arame entra na poça de fusão.

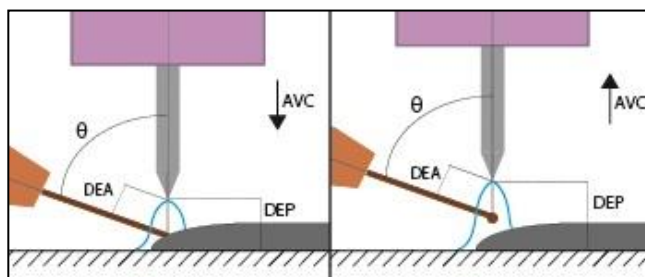


Figura 23 – Representação da posição de entrada do arame com a variação da DEP

A variação da altura do arco faz com que ora o arame seja alimentado direto na poça de fusão, ora no arco. Isto implica em diferentes tipos de “transferência”, pois quando o arame entra pelo arco, este passa a se destacar na forma de pequenas gotas, diferentemente de quando é alimentado direto à poça de fusão, onde a alimentação é contínua (sem destacamento). Questões relacionadas à metodologia de alimentação de arame serão consideradas na 4.2.4.

Vale ressaltar que fazendo uma parametrização do AVC com K_p 's baixos (baixa dinâmica de correção) e zona morta grade ($>0,5V$) o AVC não apresenta uma resposta imediata, podendo ser utilizado para correntes pulsadas. Ribeiro (20), fez o uso do AVC com uma única tensão de referência nos ensaios em corrente pulsada. Embora este método seja aplicável, o controle do processo passa a ser menos

acurado. Ademais, um intervalo de 1V na tensão arco representa uma variação de aprox. 11 %, o que não pode ser desprezado.

4.1.1.2 Controle feito a partir de duas tensões de referência independentes para cada fase

Visto que com apenas uma tensão de referência o processo apresenta grandes variações na DEP, e que isto acarreta em algumas consequências, principalmente em relação à alimentação do arame, foram desenvolvidos novos métodos de controle do AVC para correntes pulsadas.

Em processos pulsados, onde normalmente dois patamares de correntes são utilizados, o AVC desenvolvido apresenta duas tensões de referência, uma para cada período (pulso/base). Com as tensões reguladas de acordo com a curva estática representada na Figura 24, o controle do AVC tende a manter o comprimento do arco, sem oscilar com a pulsação da corrente.

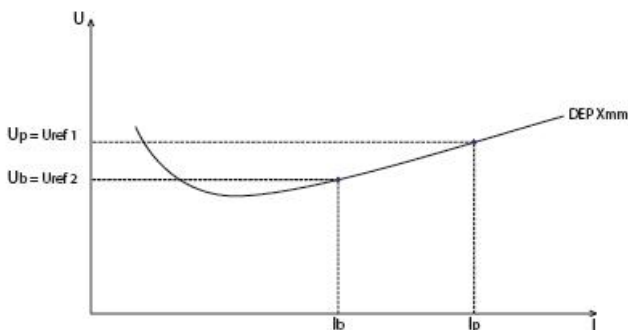


Figura 24- Representação da curva estática do processo TIG. Variação da tensão com a variação da corrente de soldagem

A implementação de duas tensões de referência acarretou na necessidade de um sincronismo entre a fonte de soldagem e o cabeçote, uma vez que, o controle da altura do arco é feito pelo cabeçote, mas a variação das correntes de soldagem é feita pela fonte. Assim sendo, o cabeçote não relacionaria a variação da tensão do arco com variação da corrente, mas sim “entenderia” como uma variação no comprimento do arco. Antes de mostrar os resultados deste método de controle será descrito a maneira com que foi desenvolvido o sincronismo entre ambos os sistemas (fonte e cabeçote).

4.1.2 Sincronismo fonte - cabeçote

Para que o AVC atue corretamente para patamares de correntes diferentes, este deve saber que a variação da tensão não foi causada por uma variação na DEP, e sim pela variação da corrente. Assim sendo, este deve saber em qual momento deve buscar cada Uref regulada, configurando correções independentes para cada patamar de corrente.

O sincronismo elaborado foi desenvolvido a partir de uma porta lógica I/O, onde os níveis lógicos alto e baixo são enviados a partir do cabeçote à fonte de soldagem. Em cada nível lógico um *set* de parâmetros e Uref são acionados. O desenvolvimento deste controle é descrito em seguida.

4.1.2.1 Interface e programa da fonte de soldagem

Inicialmente, a fonte disponível não possibilitava o sincronismo, pois não existia comunicação com o cabeçote. A primeira medida tomada, e bastante simples, foi apenas a instalação de uma porta lógica I/O que carrega parametrizações previamente salvas.

A fonte IMC Digiplus A7 permite que até 6 (seis) programas sejam salvos, de modo a facilitar o carregamento de parâmetros já definidos. De acordo com o nível lógico enviado pelo cabeçote (alto ou baixo), são carregados automaticamente os programas um (alto) ou dois (baixo) salvos na fonte. Mais adiante será explicado como os sinais alto e baixo são enviados do cabeçote à fonte.

Para uma soldagem TIG com alimentação de arame, o operador deveria então acessar o processo TIG pulsado na fonte de soldagem, uma vez que, apenas no processo pulsado era possível alimentar arame. Com os parâmetros regulados, o operador deveria retornar ao menu anterior e salvar o programa em algumas das portas, um ou dois, disponíveis na fonte.

Salvos os dois programas que serão buscados pelo sincronismo, o operador deveria ativar a porta I/O acessando este menu no painel MIG/MAG – MIX – Via I/O. A figura seguinte mostra os menus e as etapas para parametrização dos programas.

PAINEL INICIAL		
MIG/ARCO SUB.	ELET REV	CARREGAR
TIG/PLASMA	DESLIGAR	CONFIGURAR
TIG / PLASMA		
TIG PLASMA		
TIG		
TIG PULSADO	TIG NORMAL	
TIG AVANÇADO	TIG AC	
TIG PULSADO		
VARIAVEIS	CONFIGURAR	HAB. SOLDA
SALVAR	Base : (s)	CANETA
VARIAVEIS		
Ip -155 A	Ib -155 A	Vap: 1,6 m/min
tp: 0,5 s	tb: 0,5 s	Vab: 1,6 m/min
VOLTA		
VARIAVEIS	CONFIGURAR	HAB. SOLDA
SALVAR	Base : (s)	CANETA
SALVAR		
P1 LIVRE	P2: LIVRE	P3: LIVRE
P4 LIVRE	P5: LIVRE	P6: LIVRE
VOLTA INICIO		
MIG/ARCO SUB.	ELET REV	CARREGAR
TIG/PLASMA	DESLIGAR	CONFIGURAR
MIG / ARCO SUB.		
PULSADO	CONVENCIONAL	ESPECIAIS
PRODUCAO	ARCO SUBMERSO	MIX
MIX		
REPETITIVA	VIA I/O	
TEMPOS PROG		
VIA I/O		
Aguardando disparo...		
Im [0]	Um [0.0]	DESLIGAR

Figura 25- Interface da fonte de soldagem – Programação do processo TIG pulsado sincronizado 1ª versão

Quando acessado o menu “Via I/O”, ao abrir o arco voltaico os programas um e dois serão ativados pelo cabeçote orbital, de modo que em cada programa, uma tensão de referência pode ser regulada para correção de altura do arco. Desse modo, é possível manter o mesmo comprimento de arco para diferentes níveis de corrente.

Vale ressaltar que nesta primeira programação, para um processo de corrente pulsada, os programas um e dois devem conter os parâmetros de pulso e de base, respectivamente. Note que no painel de variáveis do processo TIG pulsado (Figura 25), é possível regular corrente de pulso e base, mas neste caso deve-se manter as correntes e velocidades de arame iguais. Salvo uma parametrização com corrente constante ($I_p=I_b$ e $V_{ap}=V_{ab}$) na janela um, regula-se os valores para o

outro patamar de corrente e velocidade de arame, e então salva-se na janela dois. Quando o arco estiver aberto, ora o cabeçote busca o programa com patamar de corrente alto, ora o de corrente baixa, caracterizando um processo pulsado.

A interface desenvolvida funcionou como se esperava. Foi possível ter o controle da tensão para fases distintas, porém notou-se falta de praticidade para programação dos parâmetros. Além disso, quando o arco estava aberto não era possível variar os parâmetros *online*, portanto, pequenos ajustes durante o procedimento não poderiam ser executados.

Devido a este inconveniente, buscou-se melhorar a interface da fonte de modo que o procedimento com sincronismo estivesse dentro do Menu TIG da fonte. Neste novo programa (TIG SINCRO) é possível regular dois níveis de corrente, no caso pulso e base, e duas velocidades de alimentação de arame referentes a cada corrente. A Figura 26 apresenta como ficou o programa novo.

PAINEL INICIAL		
MIG/ARCO SUB.	ELET REV	CARREGAR
TIG/PLASMA	DESLIGAR	CONFIGURAR
TIG / PLASMA		
TIG PULSADO	TIG NORMAL	TIG SINCRO
TIG AVANÇADO	TIG AC	
TIG SINCRO		
VARIAVEIS	CONFIGURAR	HAB. SOLDA
SALVAR		
VARIAVEIS		
I1 -100 A	Ua1 2,0	m/min
I2 -50 A	Ua2 2,0	m/min
HAB. SOLDA		
Aguardando disparo...		
Im [0]	Um [0.0]	DESLIGAR
PAINEL CONFIGURAR		
Icc -20 A	If -20 A	ts: 3,0 s
Ucc: 5,0 V	tf: 0,3 s	td: 3,0 s
PAINEL EM ARCO ABERTO		
I1 -100 A	Ua1 2,0	m/min
I2 -50 A	Ua2 2,0	m/min

Figura 26 - Interface da fonte de soldagem – Programação do processo TIG pulsado sincronizado versão aprimorada

Na figura é possível notar que o número de painéis para se habilitar o processo reduziu. Nesta nova interface, dentro do menu TIG,

existe a opção TIG SINCRO. Uma vez que, neste programa já são definidos os parâmetros de pulso e base ($I_1 - V_{a1}$ e $I_2 - V_{a2}$), não existe a necessidade de salvar programas e buscar a porta “Via I/O”. Neste programa, os próprios níveis 1 e 2 são acionados em níveis lógico alto e baixo respectivamente.

No menu configurar é possível parametrizar as rampas de subida e descida, além da corrente e tensão de curto circuito quando a abertura do arco é feita por este método (*lift arc*).

Ainda na mesma figura, pode-se notar que o painel de operação, isto é, quando o arco está aberto, é possível variar os parâmetros durante a execução do procedimento, o que permite pequenos ajustes *online*.

4.1.2.2 Interface e programa do cabeçote

Para que a fonte faça a alteração dos parâmetros, é necessário que ela receba os sinais alto e baixo enviados pelo cabeçote. Caso contrário, os parâmetros que serão executados serão os de índice 1 regulados no painel TIG SINCRO. A maneira que este nível lógico é enviado varia de acordo com o tipo de trajetória que o cabeçote realizará, isto é, linear ou oscilante (tecimento).

Para uma trajetória linear, os níveis lógicos são enviados de acordo com o tempo regulado na interface do controle. Os tempos são referentes à duração com que os parâmetros de cada índice (1 e 2) serão executados na soldagem, podendo ser, por exemplo, os períodos de pulso e de base. Desse modo, a fonte de soldagem comanda os níveis de corrente e alimentação de arame, e o cabeçote o período de cada fase.

A maneira com que o cabeçote foi programado para enviar sinais de alto e baixo, se baseia na contagem do número de passos dados pelo motor.

De acordo com os parâmetros de velocidade de soldagem e o tempo de sincronismo regulado, pode ser calculado o número de passos que o motor daria neste intervalo de tempo. Com a relação de transmissão [passos/mm] do motor de deslocamento em X do cabeçote; com a velocidade [cm/min] e tempo [s] regulados, o cálculo para contagem dos passos é feito a partir da seguinte equação:

$$nP = 0,167 \cdot Rt \cdot Vs \cdot ts$$

onde nP é número de passos; Rt é relação de transmissão [p/mm]; Vs é velocidade de soldagem [cm/min]; ts é o tempo de sincronismo [s]; e 0,167 é a constante para conversão de unidades.

Na programação, o controlador faz a contagem dos passos a uma frequência de 1kHz. Quando a quantidade de passos calculada é atingida, o nível analógico enviado para a fonte é alterado, que por sua vez altera os parâmetros de soldagem da fonte.

Esta metodologia foi escolhida, pois a contagem dos passos é mais fácil de ser calculada do que utilizar a contagem do *clock* do controlador e as linhas de programação são simplificadas.

Já para uma trajetória com tecimento, o sinal pode ser enviado de duas maneiras. Uma exatamente igual ao método linear (a partir dos tempos regulados), e outra de acordo com o movimento do eixo “Y”, onde é tomada a posição da tocha em relação à amplitude de tecimento para enviar os sinais (Figura 27).

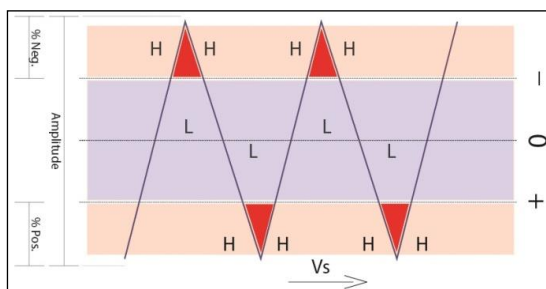


Figura 27 – Representação do sincronismo em modo de tecimento trapezoidal

Na figura representativa, os níveis alto e baixo são mostrados como H e L respectivamente (*High* e *Low*). Os sinais positivo e negativo são referentes ao sentido de deslocamento do eixo Y, sendo positivo no sentido de afastar a tocha do cabeçote e negativo no sentido de aproximá-la ao cabeçote.

Assim como para o modo linear, o sincronismo em tecimento é feito a partir da contagem dos passos do motor, porém agora, do eixo Y. Com os valores de amplitude [mm] e porcentagem do sincronismo regulados, é calculada a quantidade de passos que o motor deve dar para certo deslocamento do eixo. De uma maneira análoga ao cálculo anterior, o controlador faz a contagem do número de passos dados pelo motor para identificar a posição do eletrodo ao longo da amplitude de tecimento. O cálculo do número de passos a partir da amplitude é dado pela seguinte expressão:

$$nP = S \cdot Rt \cdot A$$

onde nP é o número de passos; S é o percentual da amplitude [%]; Rt é a relação de transmissão [P/mm]; e A é a amplitude [mm].

Vale ressaltar que o “zero” é estabelecido pela posição atual do eixo Y. Dado o número de passos a partir do zero, os sinais alto ou baixo são enviados à fonte de soldagem.

Neste tipo de sincronismo, os tempos de cada fase serão definidos em função da frequência de tecimento, além dos parâmetros de amplitude e sincronismo. Por exemplo, procedimentos com amplitudes pequenas e elevadas frequências, caracterizarão um processo pulsado com frequência alta.

Em procedimentos de passe de raiz, onde a amplitude, quando presente, é pequena, este tipo de sincronismo não tem muito sentido, sendo mais recomendado o sincronismo por tempo. Porém, em passes de preenchimento e acabamento, este tipo de controle pode acarretar em resultados favoráveis. No escopo deste trabalho, não foi utilizado tecimento para os procedimentos realizados, ficando este tipo de análise como recomendação para trabalhos futuros. O desenvolvimento deste tipo de controle não acarretou em esforços maiores, e fez parte das melhorias do cabeçote para aplicações futuras.

A interface do controle do cabeçote para opção TIG Sinc é mostrada na Figura 28.

PAINEL INICIAL		
SOLDAR POSICIONAR	ARQUIVOS INFO	CONFIGURAR DESLIGAR
CONFIGURAR		
MOTORES SOLGAR	PADRAO	PERIFERICOS
PERIFERICOS		
TIG Sinc.	Disp: Alta Freq	D=Ok: Temo
AUC: Tensao		
VOLT INICIO		
SOLDAR POSICIONAR	ARQUIVOS INFO	CONFIGURAR DESLIGAR
SOLDAR		
Passe Fonte	Movimento	Sincronismo AUC
SINCRONISMO MOVIMENTO LINEAR		
Sinc: SIM	t1: 0.2s	t2: 0.2s
SINCRONISMO MOVIMENTO TRIANGULAR / TRAPEZOIDAL		
Sinc: SIM	LP: 20n	LN: 20n
AVC (ARC VOLTAGE CONTROL)		
AUC: SIM	Uarc: -0.20	U1: 9.00
KP: 1.0	ZM: 0.20	U2: 10.50

Figura 28 – IHM do cabeçote orbital – Programação dos modos sincronizados

A partir da seleção do menu configurar no painel inicial, o operador acessa o menu Periféricos, onde se pode definir o processo a ser utilizado (na figura: TIG Sinc); o modo de disparo do arco (na figura: Alta frequência); modo de controle do AVC (Na figura: Tensão); e a maneira que o cabeçote irá interpretar a abertura de arco para início de deslocamento (na figura: Tempo).

Voltando ao painel inicial, acessa-se o menu soldar, onde então são regulados os parâmetros de tecimento, sincronismo e controle de tensão (AVC).

Quando o tipo de trajetória é linear, o menu sincronismo apresenta tempos t1 e t2, que são referentes aos períodos em que os parâmetros de índice 1 e 2 da fonte serão executados. Quando a trajetória é com tecimento, o painel de sincronismo apresenta LP e LN, que são referentes à porcentagem da amplitude positiva (LP = Lado Positivo) e negativa (LN = Lado Negativo) respectivamente. Neste caso, como mencionado anteriormente, nas laterais o nível lógico é alto, logo os parâmetros de índice 1 serão habilitados.

Note que no menu AVC existem duas tensões de referencia, U1 e U2, as quais se referem aos parâmetros de índice 1 e 2 respectivamente na fonte de soldagem.

O sincronismo foi uma ferramenta necessária para que a atuação do AVC fosse adequada. Comandados pelo controlador, os níveis lógicos habilitam os índices 1 e 2, configurando parametrizações independentes para cada períodos.

4.1.3 Resultado a partir de um programa sincronizado

Com o programa sincronizado o controle de altura do arco ficou mais acurado e não ocorrem mais as variações do comprimento do arco. Vale ressaltar que as tensões de referência devem ser reguladas adequadamente para cada patamar de corrente, caso contrário, o AVC continuará a variar o comprimento do arco. Na Figura é mostrado o oscilograma de um procedimento com controle de tensão sincronizado.

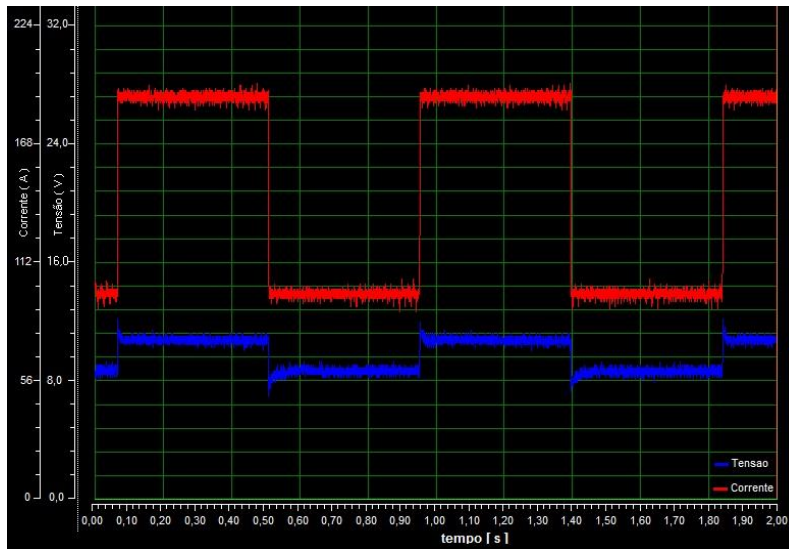


Figura 29 - Oscilograma de tensão e corrente com controle de tensão a partir de duas referências

Os parâmetros utilizados neste ensaio são mostrados na tabela seguinte.

Tabela 2 – Parametrização do ensaio com controle de tensão feito a partir de duas referências

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de Soldagem (Pulso/Base)	A	190/90
Tempo de Pulso/Base	s	0,4/0,4
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	10,5/8,5

Pela análise do SAP, pode-se verificar que a tensão se mantém estável em ambos os períodos. Diferente da curva mostrada na Figura 20, a tensão não apresenta a rampa ocasionada pela variação do comprimento do arco. Neste processo as tensões médias do pulso e da base foram 10,6 e 8,7 V respectivamente, valores bem próximos aos regulados no cabeçote.

Além da tensão estável, os tempos de pulso e base medidos foram de 0,42 s. Isso mostra que o cálculo do tempo a partir da contagem de passos se mostrou uma maneira bastante prática e eficaz na programação dos tempos de pulso e base do sincronismo.

4.1.4 Dispositivos mecânicos

Além da parte de programação da fonte e do cabeçote, dispositivos mecânicos foram projetados e fabricados para adequar o cabeçote orbital à soldagem TIG orbital. Para isto, foram desenvolvidos novos direcionadores de arame e um novo suporte de tocha.

O direcionador de arame tem como objetivo de direcionar o metal de adição corretamente. Este deve possibilitar uma correção no ângulo de alimentação e direção, mantendo o arame alinhado com o eletrodo e o eixo longitudinal do cordão de solda. Inicialmente, contava-se com um direcionador de arame já disponível no laboratório (Figura 30).

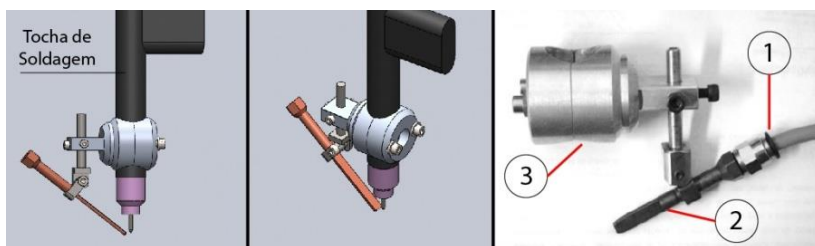


Figura 30 – Modelo em CAD e protótipo fabricado do direcionador de arame. 1) Conexão e mangueira pneumática; 2) Bico de contato MIG/MAG; 3) Sistema de fixação à tocha

Neste direcionador poderia se regular o ângulo de alimentação, mas não se podia fazer sua correção durante o processo. Uma vez posicionado, e apertado por parafusos, o ângulo era mantido ao longo do procedimento. Ademais, fez-se o uso de um bico de contato para tochas MIG/MAG para o direcionamento, e o conduíte foi constituído de uma mangueira pneumática com um conduíte de arame de solda interno.

A liberdade de poder fazer correções no ângulo de alimentação é crucial para um processo TIG orbital alimentado, pois com pequenas variações no ângulo de alimentação, diferentes tipos de “transferência” do metal de adição podem acontecer (efeitos da alimentação de arame serão descritos na seção 4.2.4). Assim sendo um novo protótipo foi projetado de modo a permitir tais regulagens. A Figura 31 mostra como ficou o dispositivo.

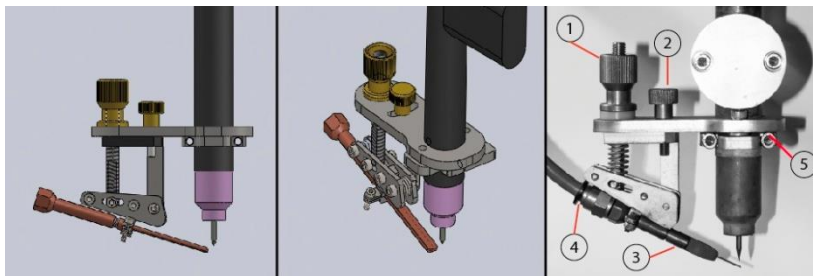


Figura 31 - Modelo em CAD e protótipo fabricado do direcionador de arame com regulagem de ângulo. 1) *Knob* para regulagem do ângulo de alimentação; 2) *knob* para alinhamento do arame com o eixo do cordão; 3) bico de contato MIG/MAG; 4) conexão e mangueira pneumática; 5) Sistema de fixação à tocha

O dispositivo projetado conservou a idéia do bico de contato MIG/MAG e do conduíte do arame passando por uma mangueira e conexão pneumática. Estes componentes mostraram-se bastante eficientes e podem ser encontrado facilmente no mercado como peças de reposição. Além disto, o bico de contato MIG/MAG permite a troca do diâmetro quando a bitola do arame for diferente. O diferencial deste dispositivo foi a liberdade de se corrigir o ângulo de alimentação. O *knobs* 1 e 2 mostrados na Figura 31 permite variar o ângulo de alimentação (*knob* 1) e o alinhamento ao eletrodo e cordão de solda (*knob* 2).

Embora o direcionador de arame tenha se apresentado eficaz, o sistema de fixação do bico de contato e do sistema todo à tocha não ficaram práticos. Para fixar o regulador à tocha ou até mesmo

reposicioná-lo, deveria se retirar a tocha do cabeçote, pois esta restringia a remoção do dispositivo.

A partir destas limitações destacadas, correções no projeto foram efetuadas, e um novo protótipo foi gerado. Este é mostrado na Figura 32.

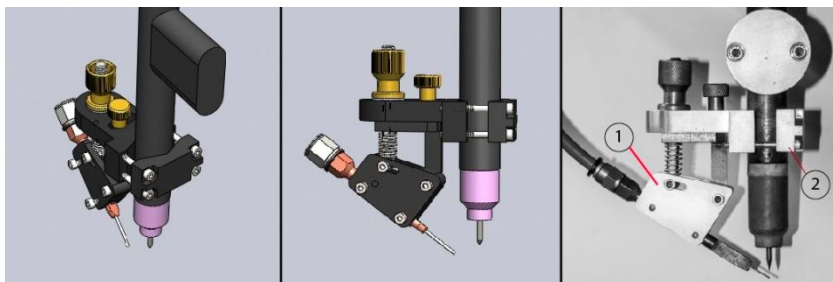


Figura 32 – Modelo e CAD e direcionador de arame final. 1) sistema de fixação do bico de contato otimizado; 2) sistema de fixação à tocha otimizado.

Vale ressaltar que os direcionadores de arames foram desenvolvidos ao longo do trabalho. Nos ensaios orbitais realizados foram utilizados os três direcionadores, sendo o mais utilizado o mostrado na Figura 32.

Um ponto importante a ser comentado é que quando se faz a variação do ângulo de alimentação, a Distância Eletrodo-Arame varia. Neste trabalho, a definição do posicionamento do direcionador foi feita da seguinte maneira: Regulava-se o ângulo de alimentação em 60° . A partir deste ângulo, regulava a posição do direcionador em relação à tocha de modo a manter um DEA aproximadamente de 1,5mm. Devido a pequenos ajustes no ângulo durante o procedimento, a DEA não foi tomada como parâmetro, mas sim como uma referência.

Além do direcionador de arame, houve a necessidade de se projetar um suporte de tocha adequando para o processo. Os requisitos para o suporte de tocha foram: liberdade de se ajustar um ângulo de ataque (puxando ou empurrando no sentido longitudinal do cordão), e um ângulo no plano transversal do cordão. O suporte projetado é mostrado na figura seguinte.

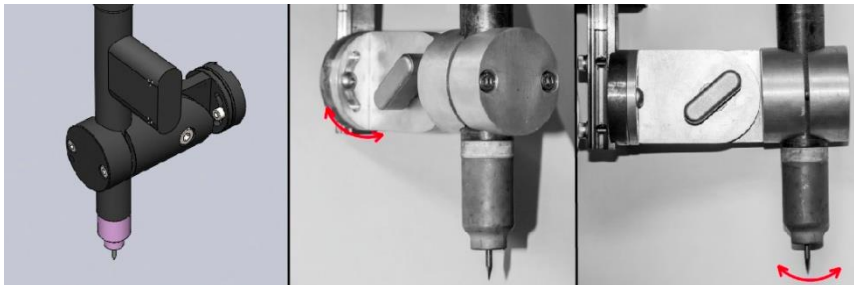


Figura 33 - Suporte de tocha projetado

O ângulo lateral foi imposto por uma aplicação exclusiva. Neste caso, o chanfro o qual a tocha foi submetida exigiu um ângulo lateral. No escopo deste trabalho, o ângulo lateral não foi utilizado, mas o desenvolvimento do suporte já visou aplicações futuras.

4.2 ENSAIOS ORBITAIS

A segunda parte do desenvolvimento consiste na execução dos ensaios orbitais. Nesta seção, serão detalhados os ensaios seguidos da exibição e discussão dos resultados.

4.2.1 Ensaios orbitais em corpos de prova adoçados

Primeiramente, os ensaios orbitais efetuados foram realizados sobre corpos de prova que passaram pelo processo de adoçamento durante sua fabricação. Devido ao fato de que as influências do adoçamento só foram percebidas ao longo do trabalho, houve distinção entre os ensaios realizados sobre corpos de prova adoçados e não adoçados. Tais influências serão descritas no decorrer desta seção.

4.2.1.1 Ensaio Orbital 360° preliminar (CPJ 04)

O primeiro ensaio orbital foi realizado a partir de um conjunto de parâmetros previamente levantado em um ensaio teste. Na posição plana, buscaram-se parâmetros que concedessem penetração total da raiz numa junta tipo J padrão (Figura 16).

Os parâmetros definidos são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parametrização do ensaio orbital preliminar – CPJ04

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de Soldagem (Pulso/Base)	A	210/110
Tempo de Pulso/Base	s	0,4/0,4
Velocidade de Arame (Pulso/Base)	m/min	1,1/0,5
Velocidade de Soldagem	cm/min	8
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	10,4/8,4

Neste ensaio a trajetória utilizada foi linear, e os fatores físicos que permanecem fixos durante a soldagem são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros fixos do ensaio orbital preliminar - CPJ04

Parâmetro	Unidade	Valor
Saída do eletrodo	mm	13
Ângulo de ponta	Graus (°)	30
Ângulo de alimentação de arame	Graus (°)	~25
Vazão do gás de proteção	l/min	12

Em um corpo de prova novo, preparado com chanfro J padrão e passado pelo processo de adoçamento, realizou-se um ensaio em 360° com os parâmetros definidos na Tabela 3. Salvo pequenas correções na trajetória e no ângulo de alimentação de arame (mantendo sempre alimentação contínua), os parâmetros foram mantidos em toda a circunferência da junta.

Iniciado na posição referente à 1h, o cordão foi realizado no sentido anti-horário. Na posição plana, como testado anteriormente, a penetração na raiz foi total e o processo seguiu estável. Antes mesmo de entrar na vertical descendente, na região de transição, o cordão passou a não apresentar mais penetração total. O processo seguiu sem apresentar fusão da raiz até a posição referente à 7h30min, onde então voltou a aparecer até pouco mais de 6h. Nesta região, o processo parou de apresentar penetração novamente. Na vertical ascendente, o processo apresentou raiz a partir das 4h. O comportamento foi oscilatório na posição sobre-cabeça, isto é, ora apresentou penetração total ora não.

Em seguida, as macrografias das posições referentes à 12h, 9h, 6h e 3h.

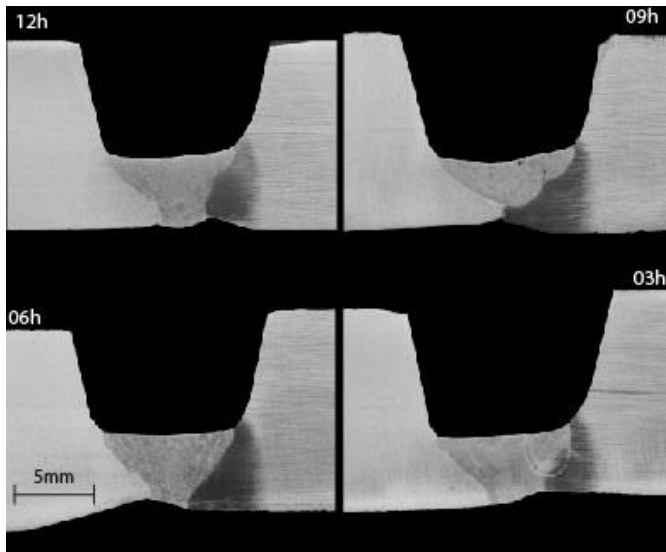


Figura 34- Macrografias das posições referentes à 12h, 9h, 6h e 3h do CPJ04

Neste corpo de prova, em nenhum ponto da posição vertical descendente apresentou penetração da raiz. Pode-se notar que na posição referente às 9h a raiz não foi conferida. Embora na macrografia da posição 6h tenha apresentado penetração, na região sobre-cabeça o comportamento da raiz foi instável. Não se pode afirmar que os parâmetros regulados são adequados para esta posição, pois como descrito antes, ora conferia-se penetração total, ora não.

Nas posições vertical ascendente e plana, o processo foi estável e a raiz foi conferida ao longo de toda a posição.

Com os resultados deste ensaio, foi possível dizer que a posição vertical descendente apresenta um comportamento bastante diferente das demais posições. Além disso, a posição sobre-cabeça também apresenta certa dificuldade para atingir penetração total. Sendo assim, consideraram-se estas duas posições como mais desfavoráveis à formação da raiz.

Vale dizer que o objetivo deste ensaio foi obter uma visão geral do processo orbital. Questões referentes à adequação de parâmetros ao longo das posições, comportamento da poça de fusão, ou influência de fatores geométricos, não foram foco deste ensaio.

4.2.1.2 Detecção da influência do adoçamento sobre a penetração da raiz

Com os resultados deste primeiro ensaio, dois corpos de prova foram destinados apenas para ensaios na posição vertical descendente e sobre cabeça, posições estas que apresentaram ser mais difícil de atingir penetração total. Como no ensaio anterior, os corpos de prova passaram pelo processo de adoçamento.

Nos ensaios de posição vertical descendente, o início dos cordões foi na posição referente às 10h finalizando às 8h. Para posição sobre-cabeça, o início foi às 7h e o final às 5h. O objetivo destes dois CP's era de adequar uma parametrização para o passe de raiz nestas posições. Foram variados parâmetros elétricos e de deslocamento (Vs).

À medida que os ensaios foram sendo executados notou-se certa influência do adoçamento no resultado dos cordões. Foi observado que, para um mesmo conjunto de parâmetros, as regiões que apresentavam adoçamento mais grosseiro a penetração reduzia. Os resultados destes dois corpos de prova serão comentados na próxima seção, a qual discutirá questões relacionadas ao adoçamento.

4.2.1.3 Influência da usinagem de adoçamento sobre o procedimento de soldagem (CPJ 05, 06 e CPJAd)

Para uma soldagem automatizada sabe-se que é mais do que necessário uma junta regular, isto é, quanto mais uniforme for a geometria do bisel ao longo da peça, melhores serão os resultados e mais fácil o controle do procedimento.

Durante a preparação dos corpos de prova, uma maneira de compensar a ovalização da peça se dá pela usinagem do diâmetro interno da tubulação. A operação de usinagem para igualar o diâmetro interno é denominada “adoçamento”.

Com o diâmetro interno definido, posiciona-se a ferramenta de corte (para chanfro V ou J) milímetros acima, de acordo com tamanho de nariz desejado. Desse modo consegue-se manter o tamanho do nariz da junta a ser soldada uniforme em toda a circunferência. Vale ressaltar que a operação de adoçamento não é feita para solucionar problemas de *High-Low*, mas sim de igualar o tamanho do nariz de bisel em toda a peça.

Durante a realização de ensaios sobre corpos de prova que passaram pelo processo de adoçamento, notou-se que, à medida que o

arco arreda sobre a peça adoçada, a penetração, monitorada visualmente pela formação da raiz, reduzia.

Estes resultados foram conferidos nos corpos de prova CPJ05 e 06 comentados anteriormente. A análise dos resultados destes dois corpos de prova serviu para verificar se o adoçamento influenciava sobre o cordão de solda.

Em primeira instância fez-se a modelagem em CAD de uma peça com bisel em J, igual ao utilizado para os ensaios. A partir do modelo gerado foi possível verificar a variação do volume de material com o aumento do adoçamento do diâmetro interno. Na Figura 35, ao lado esquerdo (A) tem-se um bisel sem adoçamento interno, e, ao lado direito da figura (B), o bisel tem o adoçamento representado pela letra “A”. O ângulo de adoçamento dos *bits* de usinagem era de 15° .

Com auxílio do *software*, variou-se a dimensão “A” e mediu-se a área resultante a partir de uma linha “imaginária” fixa traçada verticalmente, representada em vermelho.

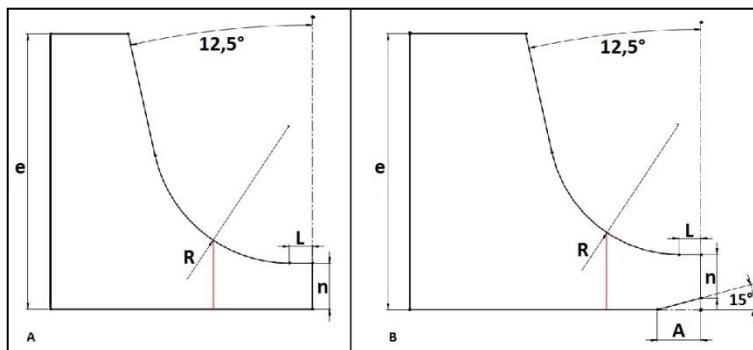


Figura 35 – Representação do processo de adoçamento (usinagem do diâmetro interno)

Os valores foram variados de 0 mm à 6 mm, com incremento de 1mm a cada medição. Tomando como referência a área de bisel com adoçamento 0 mm, os valores percentuais de aumento de área são dados na Tabela 5.

Tabela 5 - Aumento da área com o aumento do adoçamento

Adoçamento	0 mm	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	6 mm
área [mm ²]	8,70	9,41	10,02	10,51	10,89	11,30
Incremento percentual	--	8,2 %	15,2 %	20,8 %	25,2 %	29,9 %

A área incrementada é consideravelmente grande para que este volume de material a mais venha a intervir no comportamento do cordão de solda. A presença de adoçamento, o mínimo que seja, já é o suficiente para que o volume de material a ser fundido, ou até mesmo o volume de material para dissipação de calor por condução, seja maior, o que consequentemente acarreta em alterações nos resultados do passe de solda, principalmente o passe de raiz.

A Figura 36 mostra uma imagem real de um bisel com adoçamento de aproximadamente 6,5 mm, ao lado de um bisel sem adoçamento. Em ambos os biseis, o nariz, o raio de chanfro e espessura da chapa foram os mesmos.

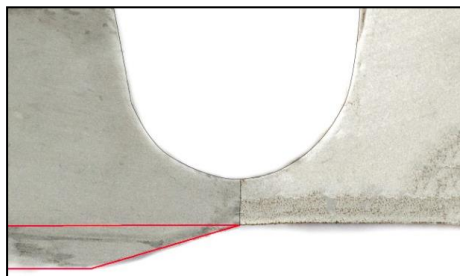


Figura 36 – Seção transversal de um bisel adoçado (esquerda) e não adoçado (direita)

Na imagem é notável a diferença de volume de material entre um lado e outro. Por mais que os narizes dos biseis apresentem mesmo tamanho, e que não há a presença de *high-low* na raiz (mas presente no *top gap*), descontinuidades consideradas críticas para procedimentos automatizados, o adoçamento mostra-se como uma variável que deve ser controlada.

No CPJ06, destinado à posição sobre-cabeça, foi efetuado um ensaio sem alimentação de arame. Foram mantidos os mesmos parâmetros de arco e deslocamento de tocha (Tabela 6), porém, a geometria da junta variou devido ao adoçamento. Inicialmente tinha-se

um bisel livre de adoçamento, e, à medida que se efetuava o passe de raiz, o adoçamento foi aumentando.

Tabela 6 – Parâmetros do ensaio com variação do adoçamento ao longo do corpo de prova

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de Soldagem (Pulso/Base)	A	210/110
Tempo de Pulso/Base	s	0,4/0,4
Velocidade de Soldagem	cm/min	8
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	10,4/8,4

Cortes nas regiões com adoçamento de 0, 1, 2 e 3 mm foram efetuados e macrografias foram geradas

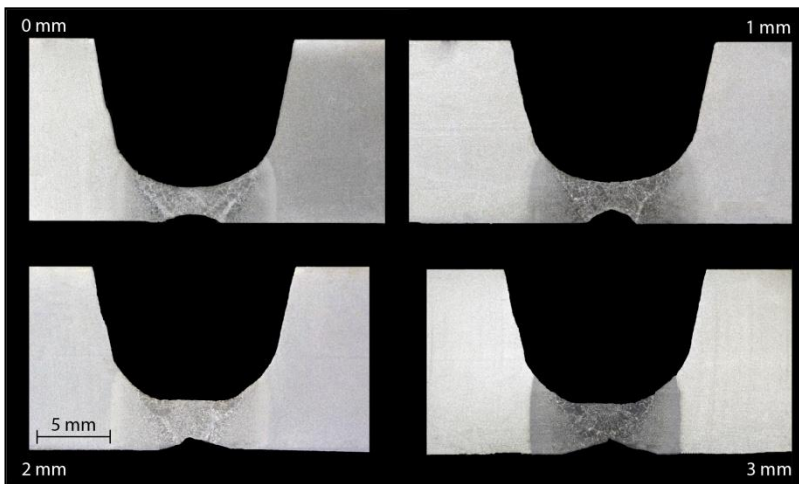


Figura 37 – Macrografias dos ensaios com variação do adoçamento ao longo do cordão de solda

Com auxílio do *software* Adobe Photoshop, foram medidas as áreas fundidas de cada corpo de prova. Os valores são mostrados na tabela seguinte.

Tabela 7 – Variação da área fundida com a variação do adoçamento

Adoçamento	0 mm	1 mm	2 mm	3 mm
Área fundida [mm ²]	15,1	14,1	12,9	11,2
Decremento de área	--	6,6 %	14,5 %	25,8 %

Nota-se pelos valores da Tabela 7 e pela Figura 37 que as áreas são bastante diferentes. À medida que o adoçamento aumentou a área fundida diminuiu.

Comparando os valores das tabelas anteriores pode-se notar certa relação entre a diminuição da área fundida com o aumento do adoçamento. Os valores percentuais do decremento da área fundida e aumento de área da seção adoçada seguem proporções bastante similares para os valores referentes à 1, 2 e 3 mm.

Após esta verificação, decidiu-se repetir o ensaio para corroborar os resultados.

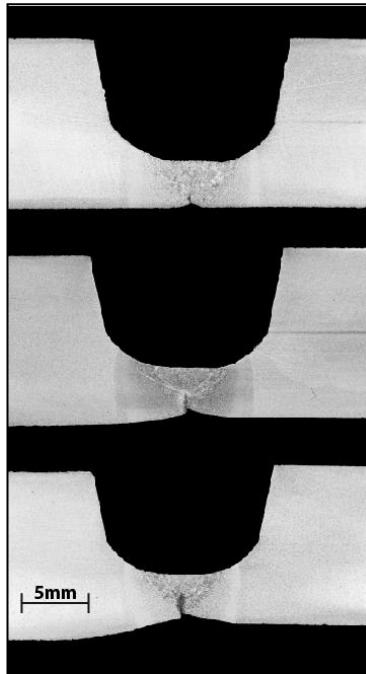


Figura 38 – Macrografias dos ensaios com variação do adocamento ao longo do cordão de solda. Repetição do ensaio

No corpo de prova mostrado na Figura 38 foi utilizado um nível de energia mais baixo. Os resultados referentes à redução da penetração com o aumento do adocamento se confirmaram. Os valores das áreas fundidas foram de 9,7 mm², 9,1 mm² e 7,9 mm², respectivamente de cima para baixo. Na figura é possível notar o aumento do nível de adocamento da macrografia superior para a inferior.

Estes resultados foram cruciais para justificar a aquisição do *ID-Tracker*, dispositivo este que será comentado na seção seguinte.

4.2.2 ID-Tracker (*Internal Diameter Tracker*)

A solução para a usinagem dos corpos de prova foi a aquisição de uma ferramenta que compensa as ovalização das tubulações. O fabricante da chanfradeira tem à disposição um dispositivo denominado *ID-Tracker* (*Internal Diameter - Tracker*), do inglês, rastreador de diâmetro interno.

Este dispositivo apresenta um sistema de molas e rolamento que permite a correção da posição da ferramenta durante a usinagem. O diâmetro interno é rastreado pelo rolete (Figura 39), que, por interferência mecânica, desloca a ferramenta. Dessa maneira, a ferramenta é posicionada a partir da face interna da tubulação e permanecerá sempre à mesma distância desta superfície. O resultado da usinagem é um chanfro com geometria uniforme ao longo da circunferência. A ovalização dos tubos, neste caso, não interfere mais no processo de usinagem.

As imagens seguintes mostram o dispositivo e o resultado dos biseis.

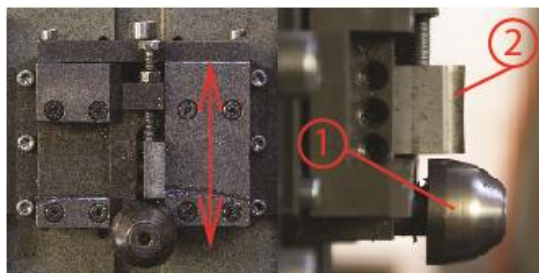


Figura 39 – ID-Tracker. 1) Rolete apalpador; 2) Ferramenta de corte

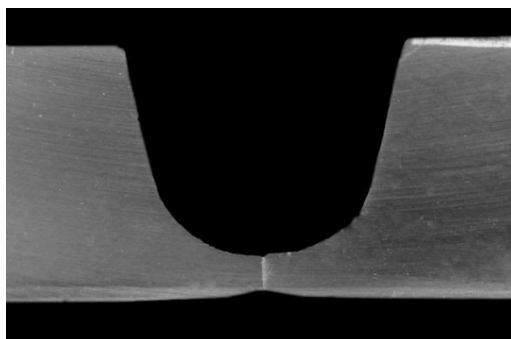


Figura 40 - Resultado da usinagem dos chanfros com o ID-Tracker

Na Figura 40 é possível notar que mesmo com o uso do dispositivo, um pequeno adoçamento é presente. Isto ocorre, pois quando o nariz do chanfro apresenta pequenas dimensões, no caso 2 mm, o rolete, que é puxado para cima pela força da mola presente, tende

a conformar a extremidade do chanfro. Embora ocorra esta pequena deformação, ela é uniforme ao longo do corpo de prova, de modo que os resultados não são influenciados.

Vale ressaltar aqui que este dispositivo é fundamental para a uniformidade dos corpos de prova e é indispensável quando se trata de soldagem orbital mecanizada. A partir deste ponto, todos os corpos de prova foram preparados adequadamente, isto é, livre de adoçamento, e os ensaios apresentaram resultados mais concretos e confiáveis.

4.2.3 Ensaios orbitais sobre corpos de prova sem adoçamento

Após a aquisição do *ID-Trakcer*, a metodologia dos ensaios teve que ser iniciada novamente, pois até então os resultados apresentaram divergências. Assim sendo, um ensaio preliminar foi efetuado de modo a levantar parâmetros de soldagem que conferissem penetração na região plana e que, posteriormente, seria executado em 360° sobre um corpo de prova.

4.2.3.1 Ensaios orbitais em 360° sem variação de parâmetros (CPJ07 e CPJ08)

Primeiramente, antes de executar um ensaio em 360°, foi efetuado um teste na posição plana para adequar parâmetros que conferissem penetração total. Os parâmetros tiveram como base o ensaio CPJJ04, porém como neste caso não havia adoçamento, optou-se por reduzir a energia de soldagem. Os parâmetros foram regulados de acordo com a tabela seguinte.

Tabela 8 – Parâmetros dos ensaios CPJ07 e CPJ08

Parâmetros Elétricos Regulados		
Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de Soldagem (Pulso/Base)	A	180/110
Tempo de Pulso/Base	s	0,4/0,4
Velocidade de Arame (Pulso/Base)	m/min	1,2/0,7
Velocidade de Soldagem	cm/min	10
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	10,0/8,4
Parâmetros Físicos		
Parâmetro	Unidade	Valor
Saída do eletrodo	mm	13
Ângulo de ponta	Graus (°)	30
Ângulo de alimentação de arame	Graus (°)	~65
Vazão do gás de proteção	l/min	12

Na posição plana este conjunto de parâmetros concedeu penetração total, desse modo, executou-se um ensaio em todo o corpo de prova sem alteração dos parâmetros, exceto pequenos ajustes na trajetória e no ângulo de alimentação do arame, de modo a manter a alimentação sempre contínua.

O resultado do ensaio foi bastante satisfatório, pois a raiz foi conferida ao longo de toda a circunferência. Além disto, o arco se manteve estável em todas as posições e a correção do AVC foi bem executada, mantendo o arco bastante próximo das tensões reguladas. O oscilograma da Figura 41 mostra o comportamento da tensão, corrente e velocidade de arame na posição plana. Nas demais posições as curvas são similares.

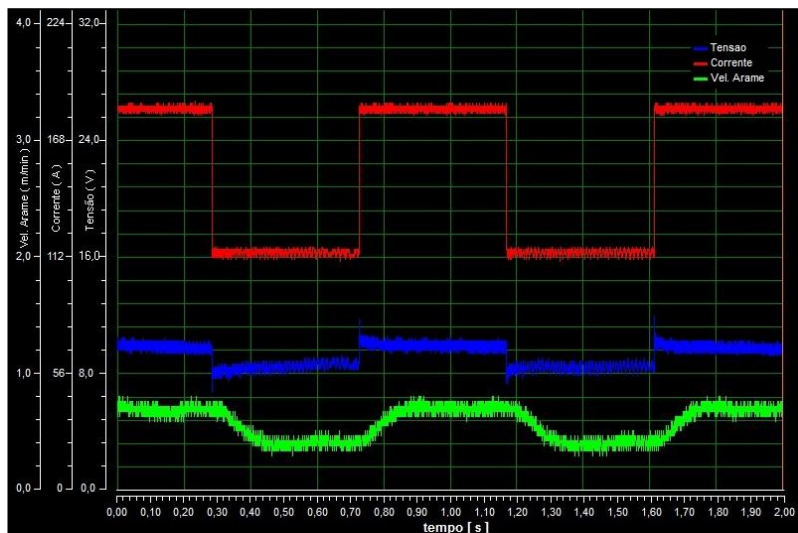


Figura 41 – Trecho do oscilograma de tensão, corrente e velocidade de arame do ensaio orbital 360° sem variação de parâmetros (CPJ07). Posição Plana

Os valores médios retirados do SAP foram:

Tabela 9 – Parâmetros médios retirados do SAP – CPJ07 Posição plana

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de Soldagem Média (Pulso/Base)	A	184/114
Tempo de Pulso/Base Média	s	0,44/0,44
Velocidade de Arame Média (Pulso/Base)	m/min	1,0/0,7
Tensão Média (Pulso/Base)	V	9,7/8,4

Vale ressaltar que nesta curva a velocidade de alimentação de arame não consegue acompanhar a dinâmica de variação da corrente. Note que no início das fases de pulso a velocidade de arame está abaixo dos 1,2 m/min regulados na fonte, e na fase de base está acima dos 0,7 m/min, por isso que a velocidade média é diferente da regulada na fonte. Fatores mais específicos sobre a alimentação de arame serão discutidos na 4.2.4.2.

O procedimento foi repetido no CPJ08, com o propósito de confirmar os resultados.

Nestes ensaios (CPJ07 e 08), embora a penetração tenha sido total em todas as posições, a geometria dos cordões variou de acordo com as posições de soldagem. As macrografias das posições referentes

às 12 horas do CPJ08 são mostradas em ordem de soldagem na Figura 42.

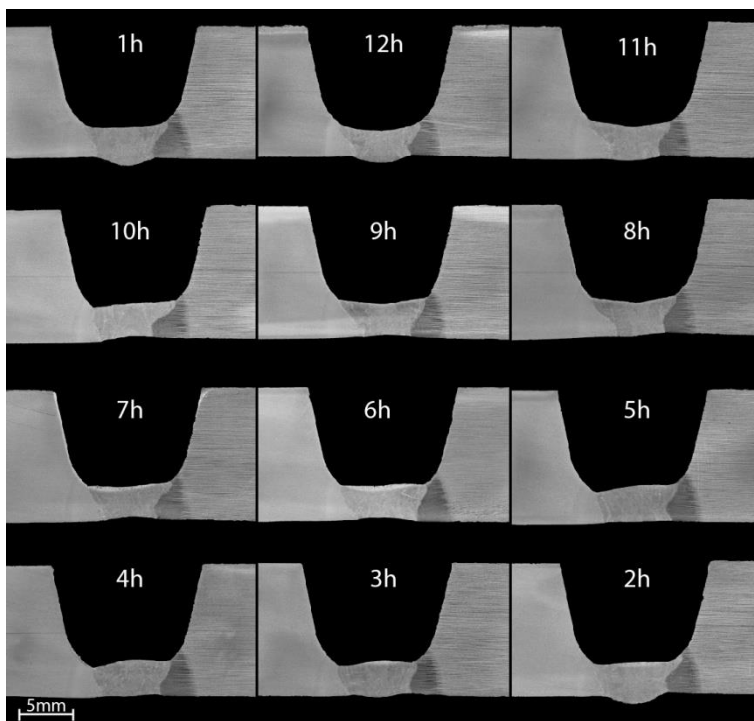


Figura 42 - Macrografias do CPJ08. Seções transversais de cada posição de soldagem

Por intermédio do *software* Adobe Photoshop, foram medidas as dimensões do cordão de solda para cálculo do fator de forma (largura/altura) e verificação da variação da geometria ao longo das posições. Os valores do fator de forma e do reforço de raiz são mostrados nos gráficos seguintes figura seguinte.

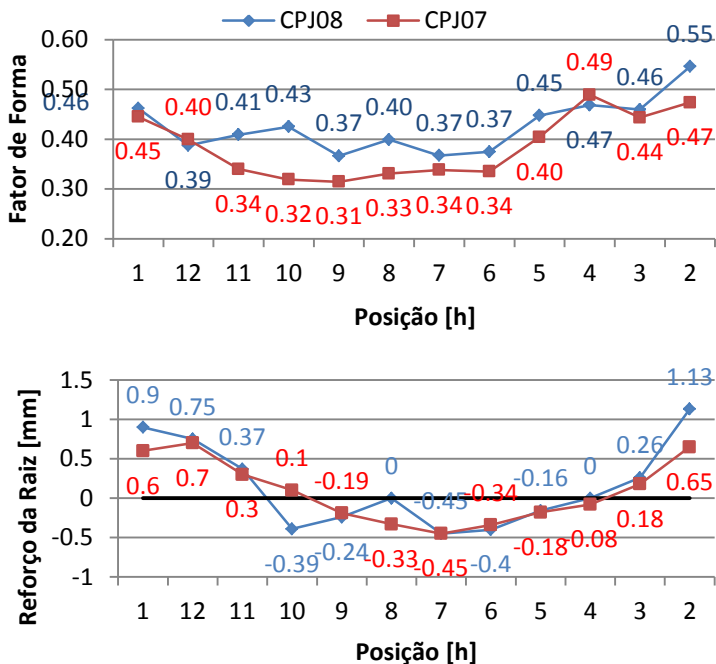


Figura 43 - Gráficos do Fator de forma e Reforço da raiz dos CPJ07 e 08

Os resultados mostrados nos gráficos da Figura 43 mostram que as geometrias dos cordões apresentaram variações com a mesma tendência em ambos os CP's. O reforço da raiz apresentou certo comportamento parabólico. Verifique que a partir das 10h o reforço da raiz é negativo, ou seja, a raiz apresenta concavidade. Em ambos os corpos de prova o rechupe (nome usual para concavidade da raiz) é presente nas mesmas posições e o maior valor se deu na posição referente às 7h (0,45 mm).

Nestes CP's o reforço é mais acentuado nas posições referentes às 1, 12, e 2h, as quais concernem à posição plana e final da vertical ascendente.

O comportamento parabólico do reforço da raiz é refletido no fator de forma. É possível verificar que nas regiões onde ocorre rechupe, a altura do cordão de solda é menor e a largura do cordão é maior, pois a poça passa a se ancorar nas paredes do chanfro. Os valores da altura do cordão e da largura são mostrados nos gráficos da Figura 44.

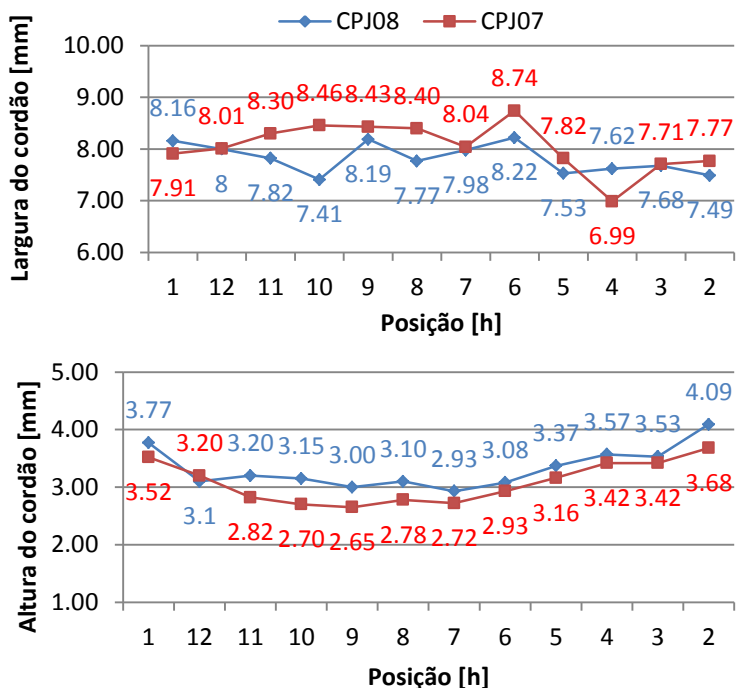


Figura 44 - Gráficos de Largura do cordão e Altura do cordão dos CPJ07 e 08

Nos gráficos anteriores se pode notar também que as curvas apresentam características bastante semelhantes, tanto na largura do cordão quanto na altura.

Os gráficos referentes a estes dois corpos de prova demonstram que o comportamento da poça ao longo das posições de soldagem se repetiu nos dois CP's, de onde se pode concluir que a adequação dos parâmetros deve ser efetuada de modo a corrigir tais variações geométricas da poça.

4.2.3.2 Ensaios orbitais 360° com presença de *High-low* (CPJ09)

Antes de realizar ensaios para corrigir as variações geométricas da poça ao longo do corpo de prova, um ensaio foi destinado para

verificar o comportamento deste procedimento na presença de desnivelamento (*high-low*) entre os corpos de prova.

O desnivelamento é uma descontinuidade presente na maioria dos procedimentos orbitais e é provocado principalmente pela ovalização dos tubos ou diferença nas dimensões nominais.

Garantir que a circunferência da tubulação não esteja ovalizada até a etapa de soldagem em campo é uma tarefa extremamente difícil, e para que isto seja possível, as etapas de fabricação e transporte, além da usinagem, deveriam ser rigorosamente controladas. Assim sendo, o CPJ09 foi confeccionado propositalmente com presença de *high-low*. O objetivo deste CP foi observar o comportamento do procedimento na presença desta descontinuidade.

Após a confecção do corpo de prova, a presença de desnivelamento se deu com a distribuição mostrada na Figura 45.

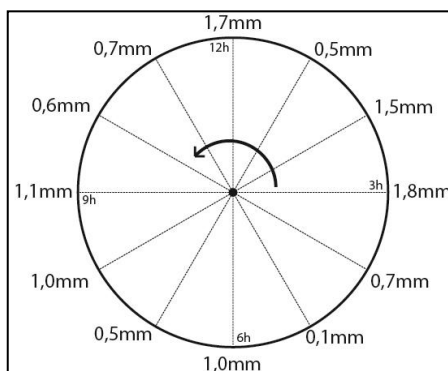


Figura 45 – Variação do desnivelamento (*high-low*) de acordo com a posição de soldagem – Ensaio CPJ09

Segundo a norma API 1104 20ªed., o desnivelamento não deve exceder 3 mm (24). Vale ressaltar aqui que o desnivelamento não poderia ser maior devido ao fato de que o nariz do chanfro era de 2 mm. Caso o desnivelamento fosse superior à 2mm, certo vão, ou *gap*, seria presente entre os tubos. Neste caso, o maior *high-low* foi de 1,8mm na posição referente à 3h.

Os parâmetros utilizados neste ensaio foram exatamente iguais aos regulados no CPJ07 e 08 descritos anteriormente, e podem ser verificados na Tabela 8.

Após a execução do ensaio, o resultado foi uma raiz com penetração total em todas as posições exceto às 9h. Como mostrado nos

resultados anteriores, a posição relativa às 9h é a região de menor penetração (vide gráficos da Figura 43). Neste corpo de prova o desnivelamento de 1,1 mm não possibilitou uma raiz com penetração total, porém nas posições de 8h e 10h (vertical descendente), cujos desnivelamentos foram de 1,0 mm e 0,6 mm, a raiz foi conferida. O resultado do cordão de solda é mostrado nas macrografias da Figura 46.

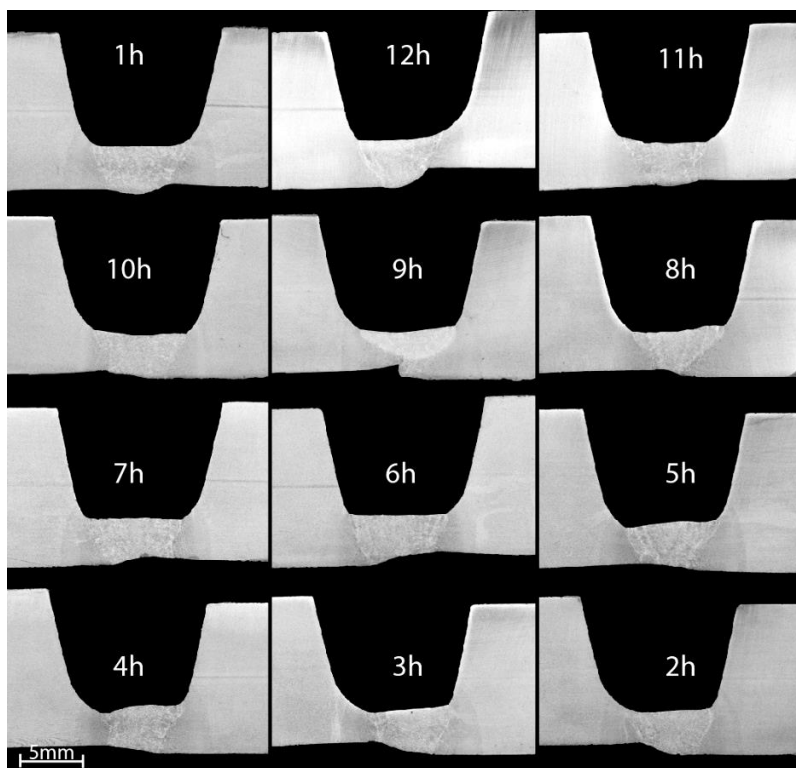


Figura 46- Macrografias do CPJ09. Seções transversais de cada posição de soldagem

Os valores geométricos do CPJ09 foram comparados com os valores médios do CPJ07 e 08. Os gráficos de largura do cordão, altura e fator de forma são mostrados na figura seguinte.

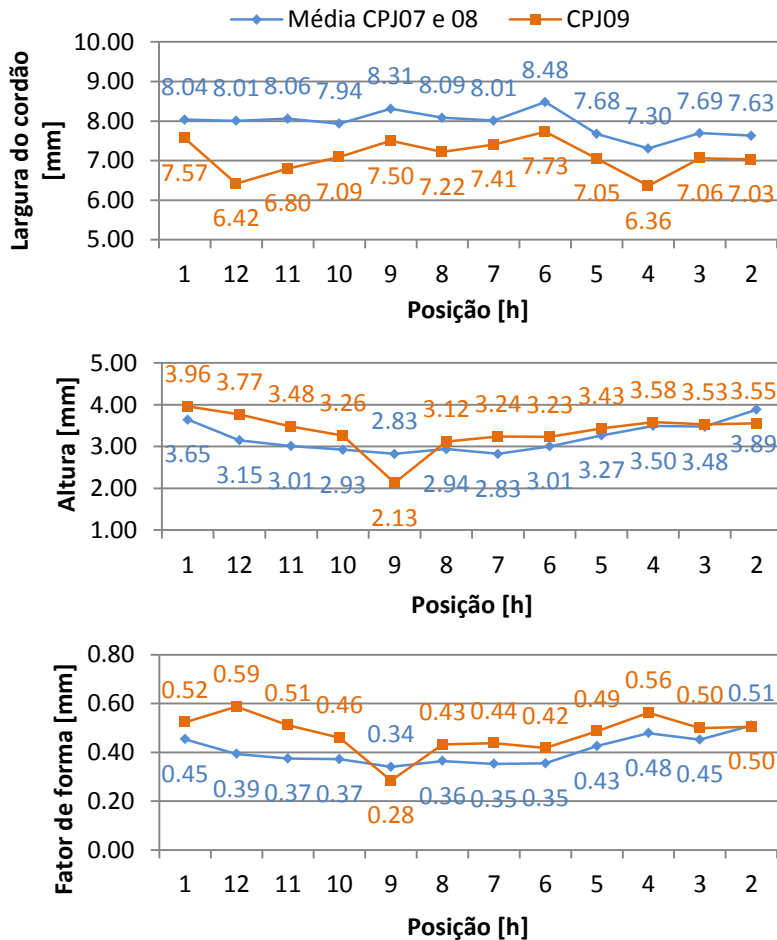


Figura 47 - Gráficos comparativos entre valores médios dos CPJ07 e 08 com o CPJ09. Largura, altura e fator de forma do cordão respectivamente

De acordo com os gráficos, as curvas de largura do cordão apresentaram o mesmo comportamento, porém com valores mais baixos para o CPJ09. Nas curvas de altura do cordão, excetuando a posição de 9h, os valores foram maiores no CPJ09 nas demais posições.

Devido à presença do desnivelamento, a altura do cordão foi maior neste CP, pois para atingir a penetração total da raiz a poça deveria compensar o *high-low* mais o nariz do chanfro. Note que em

todas as posições o valor foi maior do que a média dos ensaios anteriores, exceto na posição 9h e 2h.

Este comportamento, menor largura e maior altura, refletiu no fator de forma, que apresentou valores maiores que os anteriores, porém como uma característica bastante parecida. Assim como nos CP07 e 08, nas posições vertical descendente e sobre-cabeça, têm-se cordões de maior largura e menor altura.

Embora que na posição referente às 9h, a raiz não tenha apresentado penetração total, pode-se dizer que o desnivelamento é uma descontinuidade que não pareceu ser crítica nas proporções deste CP. A falta de raiz às 9h não pode ser justificada pela presença da descontinuidade, pois os valores de altura e largura do cordão para esta posição foram pontos afastados dos demais resultados. Neste caso, o resultado na posição de 9h pode ser desconsiderado.

4.2.3.3 Ensaios orbitais com variação de parâmetros (CPJ12, 13, 14 e 15)

Visto que, à medida que se muda de posição na soldagem orbital a geometria da solda varia, o objetivo dos ensaios com variação de parâmetros foi justamente o de adequar as variáveis para obter uma geometria mais uniforme ao longo de todo o CP, isto é, buscou-se reduzir a concavidade da raiz variando-se corrente, tensão ou velocidade de soldagem, além de aproximar os fatores de forma, uniformizando a geometria do cordão nas referentes posições.

Os ensaios foram realizados em um CP com chanfro J padrão livre de desnivelamento. As posições de soldagem foram vertical descendente e sobre-cabeça, pois foram estas posições que apresentaram maiores níveis de concavidade. Os ensaios então foram efetuados entre as posições de 9h e 5h.

O primeiro ensaio, CPJ12, teve o parâmetro U_{avc} (tensão de arco) variado. O objetivo foi de favorecer a penetração reduzindo o comprimento do arco (maior pressão de plasma) e a área de acoplamento (maior densidade de corrente). Além disso, reduzir a largura do cordão, de modo que a poça não viesse a ancorar-se nas paredes do chanfro. Consequentemente à redução da tensão do arco tem-se uma leve redução na potência do mesmo, logo, uma menor energia de soldagem, que por sua vez tem grande influência sobre a formação da concavidade.

Os parâmetros utilizados são mostrados na tabela seguinte.

Tabela 10 – Parâmetros do ensaio CPJ12

Parâmetros Elétricos Regulados – CPJ12		
Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de Soldagem (Pulso/Base)	A	180/110
Tempo de Pulso/Base	s	0,4/0,4
Velocidade de Arame (Pulso/Base)	m/min	1,2/0,7
Velocidade de Soldagem	cm/min	10
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	Variável
Parâmetros Físicos		
Parâmetro	Unidade	Valor
Saída do eletrodo	mm	13
Ângulo de ponta	Graus (°)	30
Ângulo de alimentação de arame	Graus (°)	~25
Vazão do gás de proteção	l/min	12

Em comparação aos ensaios CPJ07 e 08, que tiveram tensão de AVC regulada em 10,0 V e 8,4 V para pulso e base respectivamente, neste ensaio a tensão foi variada de 10,0/8,4 V para 9,4V/8,0 V em degraus de 0,2 V. A Tabela 11 mostra os valores de tensão para as posições de soldagem.

Tabela 11 – Variação da tensão do arco de acordo com a posição de soldagem – CPJ12

Variação da tensão do arco – CPJ12	
Posição [h]	U_{avc} (pulso/base)
10h	10,0 / 8,4 V
9h	9,8 / 8,2 V
8h	9,6 / 8,0 V
7h	9,4 / 8,0 V

Neste ensaio, os valores de tensão sofreram variação na ordem de 6%. Uma variação maior provocaria uma redução do comprimento do arco bastante acentuada, de modo a favorecer contaminação do eletrodo. Assim sendo, manteve-se esta pequena variação.

Durante a execução do ensaio a alimentação do arame foi interrompida devido a um dobramento no condutite alimentador. As posições de soldagem as quais puderam ser aproveitadas foram 9h, 8h e 7h. A partir deste ponto a alimentação foi comprometida e o resultado

não pode ser comparado com os demais. A Figura 48 mostra as seções do cordão CPJ12.

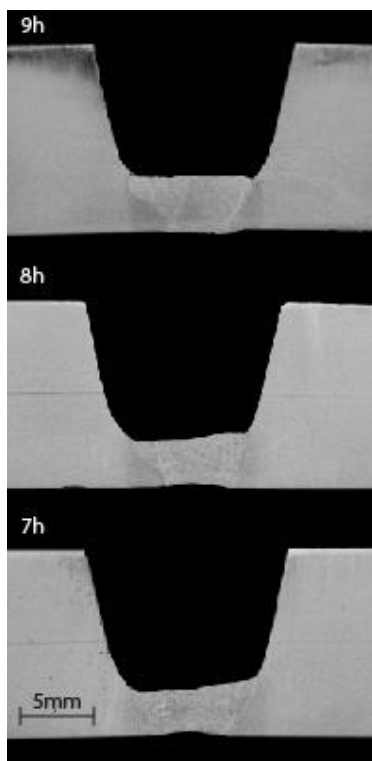


Figura 48 - Macrografias do CPJ012. Seções transversais das posições 9h, 8h e 7h

O segundo ensaio com variação de parâmetros (CPJ13) teve a variável velocidade de soldagem alterada. Neste ensaio, o que se objetivava era a redução da energia imposta à peça, pois, como descrito anteriormente, um dos principais causadores de rechupe é a energia de soldagem elevada. Os parâmetros deste ensaio são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros do ensaio CPJ13

Parâmetros Elétricos Regulados – CPJ13		
Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de Soldagem (Pulso/Base)	A	180/110
Tempo de Pulso/Base	s	0,4/0,4
Velocidade de Arame (Pulso/Base)	m/min	1,2/0,7
Velocidade de Soldagem	cm/min	Variável
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	10,0/8,4

Os valores de velocidade foram alterados de acordo com a tabela seguinte.

Tabela 13 – Variação dos parâmetros – CPJ13

Variação da velocidade de soldagem – CPJ13	
Posição [h]	Vs [cm/min]
10h	10
9h	11
8h	12
7h	13
6h	12

Neste ensaio, a velocidade foi aumentada até a posição de 7h, onde então passou a diminuir. Isto porque nos ensaios anteriores, a posição referente às 7h apresentou maior nível de rechupe. Assim sendo, a energia de soldagem nesta posição foi reduzida pelo aumento da velocidade de soldagem.

Assim como no ensaio CPJ12, o conduíte também dobrou e a alimentação foi interrompida às 6h. As únicas posições com resultados favoráveis foram 9h, 8h e 7h novamente. As macrografias são mostradas na Figura 49 - Macrografias do CPJ013. Seções transversais das posições 9h, 8h e 7h.

Vale ressaltar aqui que após os eventos de dobramento do conduíte, foi tomado cuidado para evitar este problema nos demais ensaios. Durante a soldagem orbital, devidas precauções com o arranjo dos mangotes e conduítes na bancada de soldagem devem ser tomadas. Assim, eventuais problemas como o aqui descrito são ausentes.

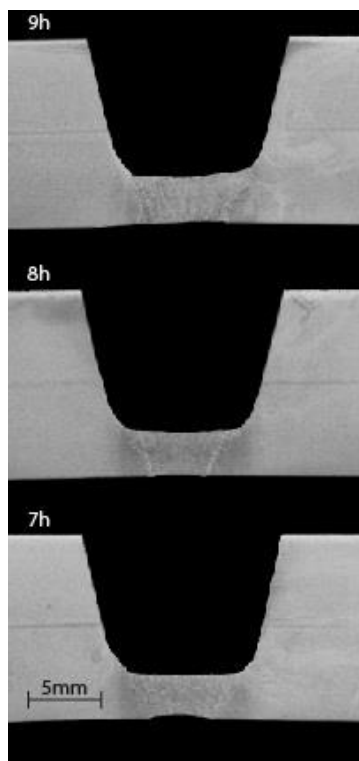


Figura 49 - Macrografias do CPJ013. Seções transversais das posições 9h, 8h e 7h

Seguindo os ensaios com variação de parâmetros, os CPJ14 e 15 tiveram as correntes de soldagem variadas. O primeiro deles, CPJ14, aumentou-se a corrente de pulso. O objetivo era corroborar que o aumento do nível de energia agravaria na formação do rechupe. O segundo deles, CPJ15, seguiu o critério de redução da energia imposta. Neste caso, o tempo de pulso foi reduzido. Os parâmetros utilizados nos dois ensaios são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros do ensaio CPJ14 e 15

Parâmetros Elétricos Regulados – CPJ14 e 15

Parâmetro	CPJ14	CPJ15
Corrente de Soldagem (Pulso/Base) [A]	250/110	180/100
Tempo de Pulso/Base [s]	0,4/0,2	0,2/0,4
Velocidade de Arame (Pulso/Base) [m/min]	1,3/0,7	1,2/0,7
Velocidade de Soldagem [cm/min]	10	10
Tensão AVC (Pulso/Base) [V]	10,8/8,4	10,0/8,4

Nestes dois ensaios, os parâmetros foram mantidos ao longo do cordão, diferentemente dos demais, que tiveram uma das variáveis alterada. Os resultados das macrografias são mostrados nas Figura 50 e Figura 51.

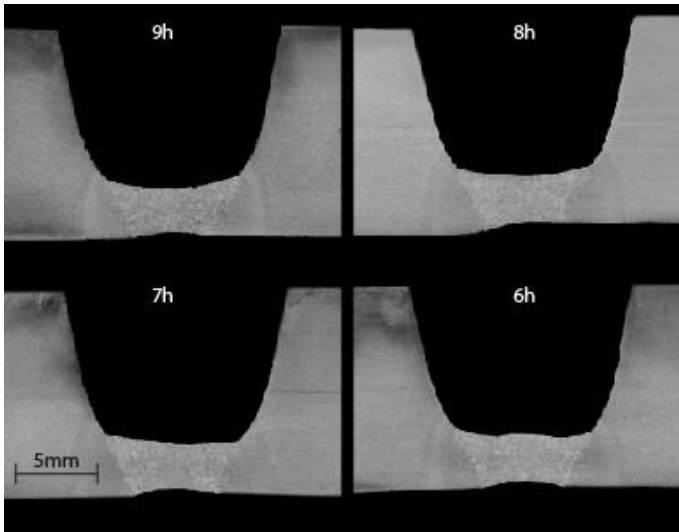


Figura 50 - Macrografias do CPJ014. Seções transversais das posições 9h, 8h, 7h e 6h

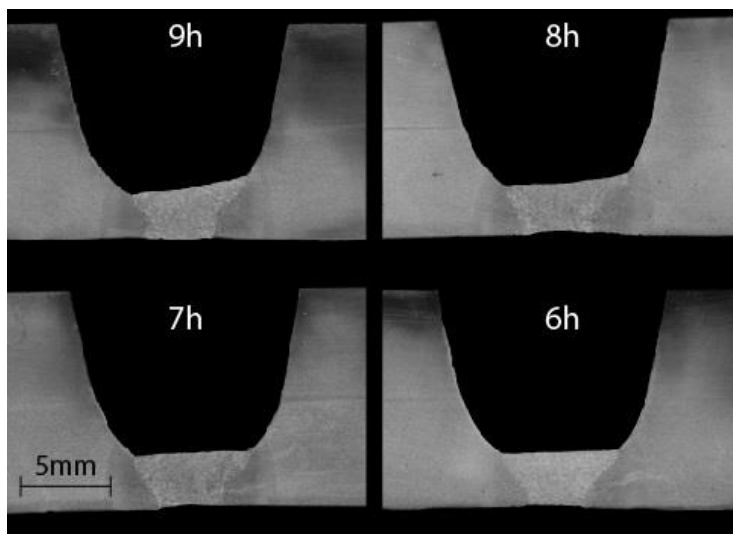


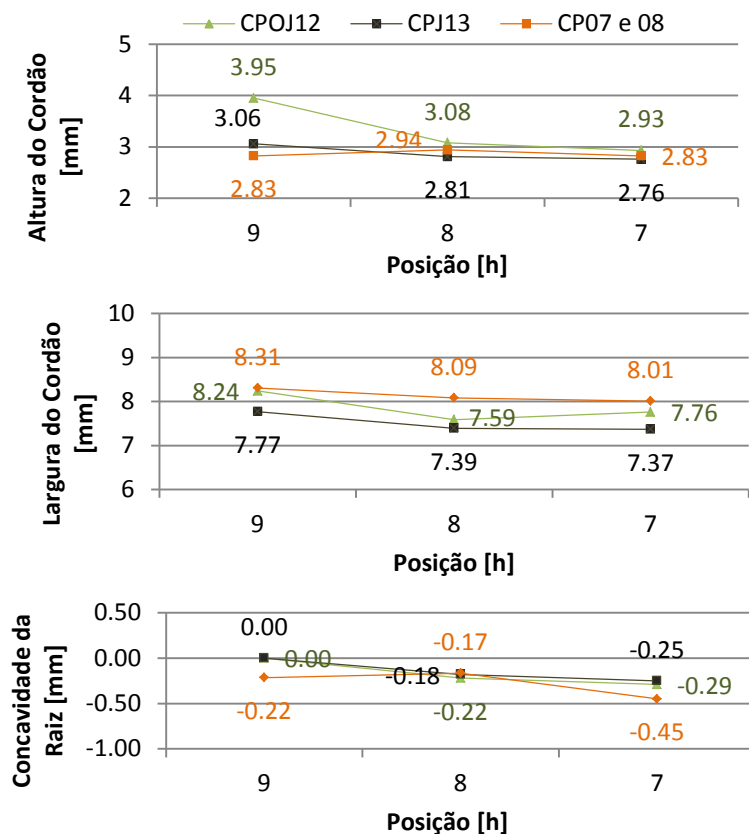
Figura 51 - Macrografias do CPJ015. Seções transversais das posições 9h, 8h, 7h e 6h

No primeiro ensaio desta leva, CPJ12, a redução da tensão não resultou em grandes variações no resultados. Visualmente é possível notar que a concavidade na raiz ainda é presente nas posições de 8h e 7h (vide Figura 48). A análise dos oscilogramas de tensão corrente e velocidade de arame (vide APÊNDICE A) mostrou uma redução muito pequena na potência do arco, na ordem de 50 W comparando com o ensaio CPJ07. Esta redução pode ser explicada pelo pequeno decremento da tensão média do arco. No CPJ07 e 08 as tensões médias foram de 9,1 e 9,0 V respectivamente. No ensaio 12, a tensão média foi de 8,5 V. Os demais parâmetros (corrente e velocidade de arame) continuaram iguais.

Embora eletricamente não houvesse grandes variações, geometricamente os resultados foram diferentes. As características geométricas do cordão resultante foram comparadas com os CP's 07 e 08 e estão plotadas graficamente na Figura 52. Para a posição de 9h, a concavidade foi nula. Para as demais posições (8h e 7h) teve-se um valor de 0,22 e 0,29 mm. Comparando com os valores médios dos CP's 07 e 08, o nível de “rechupe” caiu na posição de 7h, mas manteve-se maior para a posição de 8h. Retornando à Figura 43 (gráficos dos CP08 e 07), pode ser verificado que o valor conferido no CPJ12 foi menor que para o CPJ07 (0,33 mm). Já o CPJ08 não apresentou concavidade nesta

posição. Na posição de 7h, o valor foi menor que de ambos os CP's (07 e 08), na ordem de 35 % mais baixo (0,29 contra 0,45 mm).

Além da concavidade da raiz, o CPJ12 apresentou menor largura de cordão e maior altura. Os valores mostrados nos gráficos da Figura 52 refletem em um fator de forma maior que os CP's 7 e 8. Note que para todas as posições a largura do cordão foi menor e a altura maior.



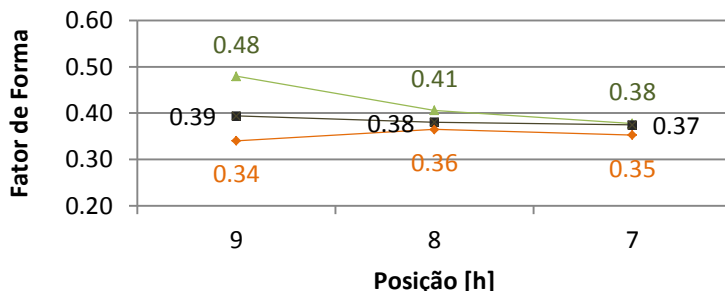


Figura 52 - Gráficos comparativos entre valores médios dos CPJ07 e 08 com o CPJ12 e 13. Altura, Largura, Concavidade da raiz e fator de forma do cordão respectivamente

No ensaio CPJ13, pela análise dos oscilogramas (vide APÊNDICE A), os valores de corrente, tensão e potência foram bastante similares ao CP's 07 e 08. Os valores foram 9,2 V, 151 A e 1430 W respectivamente para o CP13. Os valores para o CP07 foram 9,1 V, 149 A e 1398 W.

Os valores de velocidade de soldagem variados acarretaram numa redução da energia de soldagem na ordem de 8 % entre as posições 8h, e de 15 % entre as posições de 7h.

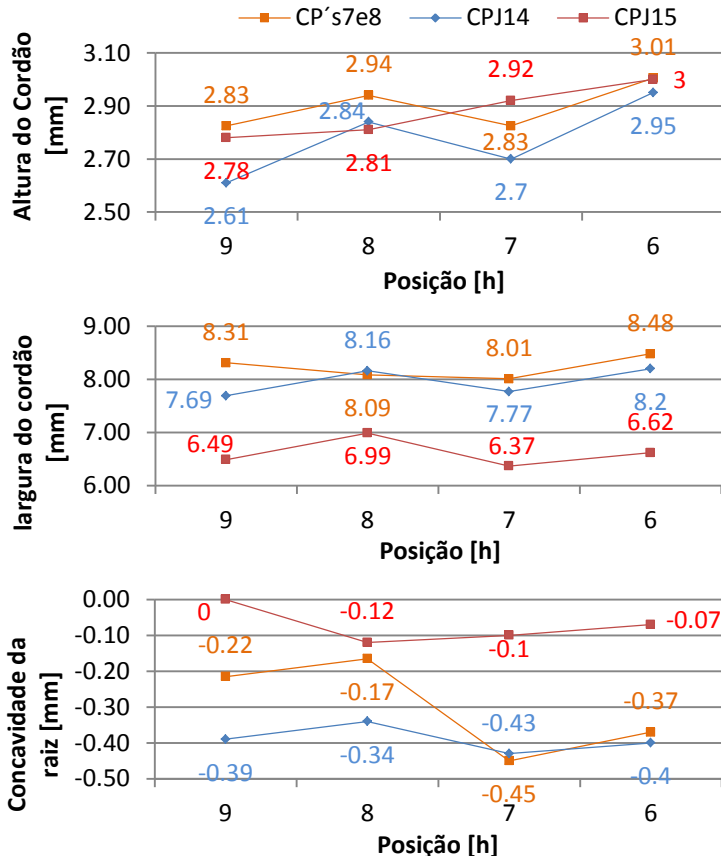
Observando os valores geométricos deste CP, nota-se que houve uma redução no nível de concavidade da raiz bastante considerável. Na posição de 8h o valor de 0,18 mm foi menor que todos os demais ensaios, exceto o CPJ08 que obteve 0 mm (Figura 43). Na posição de 7h este comportamento se repetiu, revelando um valor de 0,25 mm, o qual também está abaixo dos demais.

Já nos valores de largura e altura do cordão, pode ser visto que ambos apresentam valores menores que os demais. Embora tenha ocorrido uma redução nos valores geométricos da poça fundida, esta não foi proporcional a redução da energia de soldagem. Nota-se que a redução para a posição de 8h foi de 5 e 9 % para altura e largura respectivamente. Para a posição de 7h estes valores são da ordem de 8 e 3 %.

Pelo fator de forma, o aumento da velocidade de soldagem mostrou melhores resultados que com o encurtamento do arco. Os valores foram bastante próximos (0,39, 0,38 e 0,37) para as três posições, o que demonstra um comportamento mais uniforme ao longo do cordão.

Analisando agora os corpos de prova os quais foram variados a corrente de soldagem (CPJ14 e 15), a partir da Figura 50 e Figura 51 já se pode dizer que o aumento da corrente de pulso não foi uma medida adequada para reduzir concavidade da raiz.

Pelas análises dos oscilogramas (vide APÊNDICE A), os valores médios de corrente tensão e potência do arco para o CPJ14 foram de 163 A, 9,5 V e 1600 W respectivamente, sendo esta última na ordem de 14 % mais alta que os CP's anteriores. Ademais, para manter o comprimento do arco estável, para um corrente de soldagem mais elevada, a tensão do arco teve de ser regulada em 10,8 V. Em termos de energia de soldagem, devido a não variação da velocidade de soldagem, neste CP o nível foi mais elevado que os anteriores.



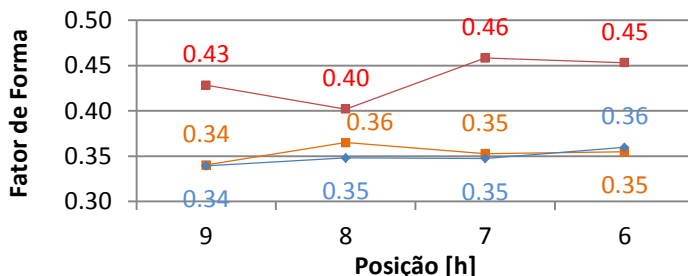


Figura 53 - Gráficos comparativos entre valores médios dos CPJ07 e 08 com o CPJ14 e 15. Concavidade da raiz, largura, altura e fator de forma do cordão respectivamente

Pelos gráficos da Figura 53 pode-se notar que no CPJ14 a concavidade apresentou valores mais elevados que os demais, exceto na posição referente às 7h, embora os valores sejam bastante próximos (0,43 e 0,45 mm). Nas demais posições os valores foram bastante superiores, principalmente às 9h e 8h.

Embora a largura do cordão nas posições ensaiadas não tenha apresentado valores mais elevados, a altura do cordão ficou menor devido à concavidade excessiva, sendo esta fundamentalmente causada devido à maior energia imposta.

Analisando agora o CPJ15, os resultados foram bastante diferentes que os demais cordões. Dos oscilogramas de corrente, tensão e potência (vide APÊNDICE A), os valores médios foram 130 A, 9,0 V e 1200 W respectivamente. Assim como no ensaio anterior, não se variou a velocidade de soldagem, então a energia imposta neste CP foi da ordem de 15 % mais baixa. Para isso, variou-se apenas o tempo de pulso, neste caso em 0,2 s.

Os resultados geométricos são evidentes. Na Figura 51, visualmente é possível notar que a redução da concavidade da raiz foi bastante acentuada. Nos gráficos da Figura 53 pode ser visto que estes valores são bastante baixos em relação aos demais ensaios, sendo nulo para a posição de 9h e na ordem de 0,1 mm nas demais posições.

A largura do cordão ficou na ordem de 1 mm menor que os demais, refletindo em um fator de forma mais elevado (todos acima de 0,4).

Nas macrografias é possível ver que a geometria da poça apresentou uma tendência afunilada. Pode-se explicar isto pelo fato de que, com o tempo de pulso reduzido, tempo a qual a poça tem seu volume aumentado, esta não consegue se expandir e acoplar-se nas

paredes do chanfro, resultado em um cordão de menor largura e maior penetração. O reflexo disto está na concavidade da raiz. Com uma poça menos fluida e menos ancorada aos flancos do chanfro, a solidificação da mesma não tende a “puxá-la” para fora do chanfro, o que caracteriza o “rechupe”.

Comparando-se os corpos de prova CPOJ13 e 15, os quais apresentaram melhores resultados a partir da variação da velocidade de soldagem e tempo de pulso respectivamente, pode ser visto no gráfico seguinte que a redução da energia através do tempo de pulso apresentou uma redução na concavidade da raiz mais acentuada.

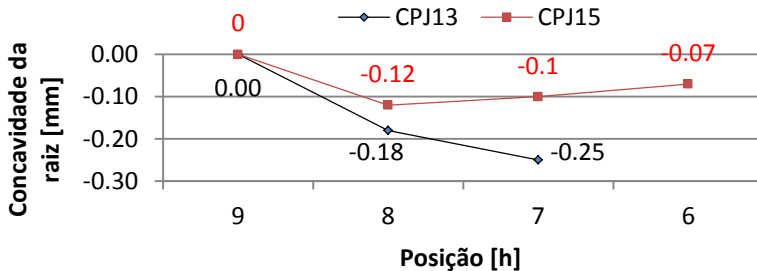


Figura 54 – Gráfico comparativo entre valores dos CPJ13 e 15. Concavidade da raiz

Embora os ensaios fossem realizados focando resultados que não conferissem concavidade na raiz, ou apenas a redução desta, vale ressaltar que todos resultados obtidos estão de acordo com a norma API1104. Os valores de concavidade são abaixo do limite máximo definido em 1,6mm, e as raízes não apresentaram falta de fusão, trincas, mordeduras ou qualquer outra descontinuidade que reprovasse o resultado.

4.2.3.4 Ensaio orbital 360° com variação de parâmetros (CPJ16)

Com os resultados obtidos nos ensaios anteriores, um corpo de prova foi elaborado para a realização de um ensaio em 360° com correção dos parâmetros. O CP foi elaborado com o chanfro J padrão e a sequência de soldagem se iniciou à 1h com progressão anti-horária.

Neste ensaio, visto que a redução da energia reduziu os níveis de concavidades, optou-se por reduzir o tempo de pulso nas demais

posições, uma vez que, o reforço da raiz também foi acentuado em algumas posições, principalmente na posição plana. Assim sendo, os parâmetros utilizados neste ensaio são mostrados na tabela seguinte.

Tabela 15 - Parâmetros do ensaio CPJ16

Parâmetros Elétricos Regulados – CPJ16

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de Soldagem (Pulso/Base)	A	180/110
Velocidade de Arame (Pulso/Base)	m/min	1,2/0,7*
Velocidade de Soldagem	cm/min	10
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	10,0/8,4

Variação do tempo de pulso de acordo com a posição

Posição [h]	Tempo de pulso/base [s]	Posição [h]	Tempo de pulso/base [s]
Início	0,4 / 0,4	07	0,2 / 0,4
1	0,3 / 0,4	06	0,2 / 0,4
12	0,3 / 0,4	05	0,2 / 0,4
11	0,3 / 0,4	04	0,3 / 0,4
10	0,3 / 0,4	03	0,3 / 0,4
09	0,2 / 0,4	02	0,3 / 0,4
08	0,2 / 0,4	Final*	0,4 / 0,4

*No fechamento do cordão a alimentação de arame foi cortada

Neste CP, o início do cordão foi feito com tempo de pulso mais elevado de modo a propiciar a formação da raiz, mas logo em seguida já reduzido para 0,3 s. Além disto, o final do cordão teve a alimentação de arame “cortada” para a realização do fechamento do cordão. Neste caso, o cordão sobrepôs-se pouco mais de 15 mm.

As macrografias referentes à seção de todas as posições são mostradas na Figura 55.

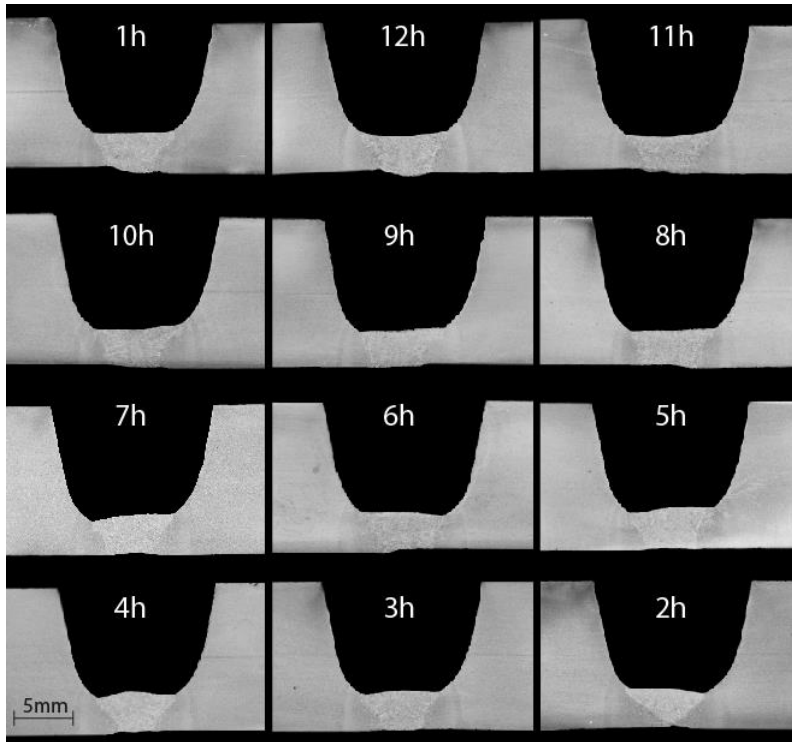


Figura 55 - Macrografias do CPJ16. Seções transversais de cada posição de soldagem

Em primeira instância já é possível notar que a geometria ao longo do cordão foi mais uniforme, exceto para a posição de 2h, onde não houve penetração total da raiz. O nível de concavidade foi reduzido e apenas em duas posições é notável sua presença, que são às 8h e 7h. Neste CP, devido à redução do tempo de pulso também na posição plana, o reforço da raiz foi reduzido. Note que apenas às 12h esse reforço foi acentuado.

Através do gráfico da Figura 56, podem ser comparados os valores geométricos dos CP's 07 e 08 com o resultado do CPJ16.

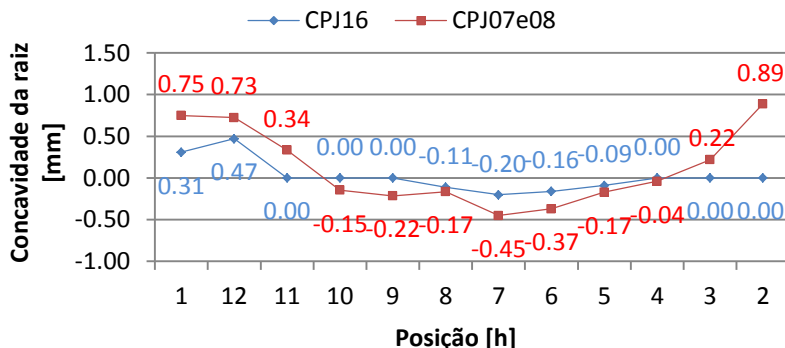


Figura 56 - Gráfico comparativo entre valores dos CPJ07, 08 e 16. Concavidade da raiz

O comportamento da curva foi bastante similar aos demais ensaios, porém com níveis de reforço e concavidade menores. Nas regiões dos CP's 07 e 08 onde o reforço foi acentuado (1h, 12h, 11h, 3h e 2h), a redução foi bem evidente, sendo nula em algumas posições (11h, 3h e 2h) e inferior nas demais (1h, 12h). Além disso, nas regiões onde a concavidade era presente (10h, 9h, 8h, 7h, 6h, 5h e 4h) este índice foi reduzido, em grande parte, à zero (posições 10h, 9h e 4h).

Os valores de fator de forma (Figura 57) foram ligeiramente mais altos que os anteriores, exceto às 2h, que deve ser descartado devido a não penetração total da raiz. Esta pode ser explicada por um desvio à esquerda da trajetória do eletrodo. Note que na macrografia (Figura 55) é possível verificar que a poça encontra-se deslocada para a peça à esquerda.

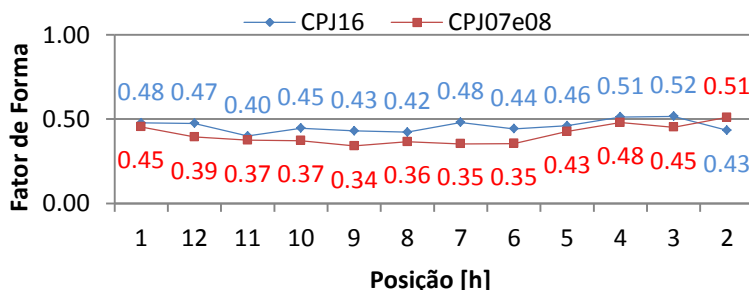


Figura 57 - Gráfico comparativo entre valores dos CPJ07, 08 e 16. Fator de forma

Este CP também apresentou, em algumas posições (1h, 8h, 6h e 4h), desnivelamento entre as peças. Assim como no ensaio CPJ09, o qual teve o desnivelamento proposital, esta descontinuidade não foi uma barreira para o procedimento. Todas estas posições apresentaram penetração total, livre de qualquer outra descontinuidade (trinca, mordeduras, etc.), o que demonstra robustez do procedimento.

4.2.4 Análise da técnica de alimentação de arame sobre o comportamento do processo

Após os ensaios onde foi buscado um procedimento em 360° que conferisse bons resultados, isto é, baixos níveis de concavidade e reforço da raiz, além de robustez e livre de descontinuidades, foi feita uma análise da metodologia de alimentação de arame.

Como descrito anteriormente, a maneira com que o arame é alimentado define o comportamento do processo e os resultados. Os ensaios até então efetuados tiveram a alimentação contínua pela frente do arco. Além da alimentação contínua, de acordo com configuração do processo, a alimentação de arame pode ser de maneira interrompida, ou seja, ocorrem destacamentos da “ponte” arame-poça de fusão. Neste trabalho, este tipo de alimentação foi definido como “destacada”. Ademais, a alimentação de arame pode ser feita por trás do arco.

A alimentação destacada é influenciada por diversos fatores, que podem ser físicos, isto é, ângulo de alimentação, distância Eletrodo-Arame, deformações (curvas) no metal de adição; ou também na própria parametrização do processo, ou seja, velocidade de arame e corrente. Além dessas variáveis, o AVC também pode vir a influenciar sobre a alimentação do arame, como comentado na seção 4.1.1.1.

Neste trabalho, a alimentação destacada foi analisada a partir da variação do ângulo de alimentação, pela atuação do AVC, e pela influência do processo pulsado. Além desses fatores, a relação V_a/P (velocidade de arame / Potência) também define o tipo de transferência, mas neste trabalho esta relação não foi foco de estudo.

Foi destinado também, um corpo de prova com o chanfro J padrão, para verificar o comportamento do procedimento com alimentação destacada sobre um passe de raiz orbital em 360°.

4.2.4.1 Ensaio comparativo entre alimentação pela frente e por trás do arco

Inicialmente, a fim de corroborar os resultados obtidos por Delgado (6), e as recomendações encontradas nas literaturas técnicas - alimentação com arame frio deve ser sempre pela frente do arco - um ensaio sobre a superfície do tubo foi realizado.

Neste ensaio, dois cordões foram realizados, um com arame alimentado pela frente do arco e outro pro trás.

Os parâmetros utilizados são mostrados na tabela seguinte.

Tabela 16 – Parâmetros do ensaio comparativo entre alimentação pela frente e por trás do arco

Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de soldagem	A	150
Tensão de AVC	V	10
Velocidade de arame	m/min	1.0
Angulo de alimentação de arame	Graus (°)	~30
Distância Eletrodo-Arame	mm	~1.5

O resultado do cordão é mostrado na Figura 58.

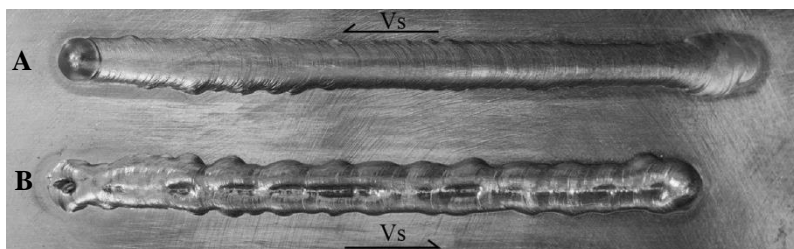


Figura 58 – Comparação entre alimentação pela frente (A) e por trás (B) do arco

Como pode ser visto, a alimentação realizada por trás (cordão inferior) acaba gerando descontinuidades no cordão. Nesta direção, o arame é imerso na região da poça já em solidificação, que por sua vez, apresenta sulcos ou “valetas” sobre o cordão.

O objetivo deste ensaio não foi de levantar uma análise detalhada de ambas a metodologias de alimentação, mas apenas justificar o uso da alimentação pela frente. Além disto, este comportamento corroborou os resultados obtidos por Delgado (6), que obteve este tipo de descontinuidade em todas as posições de soldagem para diferentes

níveis de corrente e velocidade de arame, e as recomendações da literatura técnica (21).

4.2.4.2 Fatores que causam alimentação destacada e suas influências sobre o procedimento

Como descrito anteriormente, alguns fatores podem definir a maneira com que o metal é alimentado. Nesta seção serão discutidos às influências que a alimentação intermitente tem sobre a formação do cordão de solda, bem como sobre o processo.

Os destacamentos da “ponte” arame-eletrodo são provocados por uma alteração no comprimento do arco devido à atuação incorreta do AVC, por falta de metal de adição, isto é, velocidade de arame baixa para uma dada potência de arco, ou pelo direcionamento incorreto do arame à poça fundida.

A alimentação destacada pode ser percebida através do som emitido; pode facilmente ser vista a olho “nu”; e pode ser reconhecida nos oscilogramas aquisitados via SAP. No oscilograma de tensão, o destacamento é caracterizado por repetidas variações da tensão do arco. A Figura 59 mostra a comparação dos oscilogramas de tensão quando a transferência é contínua e quando ocorrem os destacamentos. Neste caso, o ângulo de alimentação foi variado de modo a propiciar uma alimentação contínua e outra intermitente.

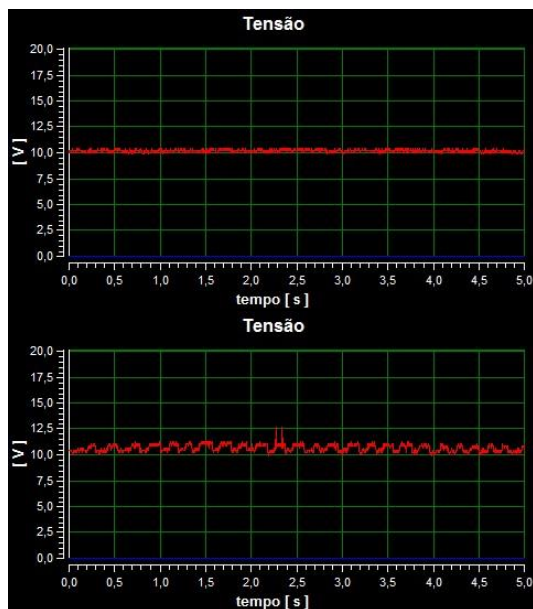


Figura 59 - Oscilogramas de tensão. Superior: Alimentação contínua; Inferior: Alimentação destacada

Note que a tensão se mantém estável em um único patamar quando a alimentação é contínua (oscilograma superior da Figura 59). Quando ocorrem os destacamentos, uma perturbação é ocasionada, provocando pequenas variações na tensão do arco.

Em um ensaio realizado em corrente constante de 150 A com velocidade de arame em 1,0 m/min, encontrou-se um ângulo de alimentação que provocasse, propositalmente, uma alimentação destacada.

Com auxílio de um vídeo, foi possível verificar que quando a alimentação é contínua, o arco acopla-se tanto na poça de fusão quanto no arame. Quando ocorre o rompimento da ligação entre o arame e a poça metálica, o arco deixa de se acoplar no arame, aumentando levemente o comprimento do arco. Além disso, o arame deixa de “puxar” a poça para cima devido às forças causadas pelas tensões superficiais presentes. Alguns frames foram selecionados e são mostrados na figura seguinte.

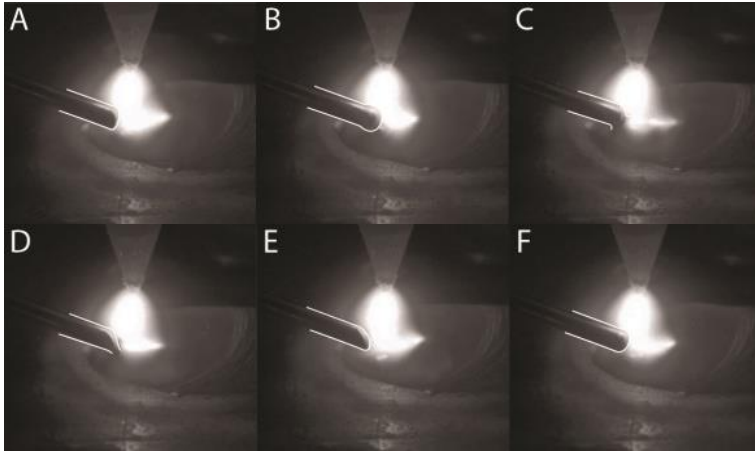


Figura 60 – Quadros de da filmagem dos destacamentos da “ponte” arame-poça de fusão

Na imagem acima, nos instantes A e B é possível verificar a formação da gota. Nos instantes C e D a gota toca a poça de fusão e o arco acopla-se também no arame. Nos instantes E e F, o arame sai da poça e uma nova gota é formada. O período que se referem às imagens de A a F tem duração de aproximadamente 0,2 s, (6 quadros de uma filmagem À 60 Hz. A cada frame selecionado, pulava-se o próximo) o que resulta em uma frequência de destacamentos na ordem de 5 Hz. Se analisar o oscilograma, podem ser contados os picos de tensão e notar que a frequência está na mesma ordem de grandeza. Para melhor verificação, uma filmagem em alta velocidade com aquisição de dados seria o recomendado.

Neste ensaio, o que foi variado para que ocorressem os destacamentos foi o ângulo de alimentação. Este é definido entre o eletrodo e o arame. Nos ensaios descritos na seção 4.2, o ângulo utilizado foi de aproximadamente 65° .

Durante a filmagem de um ensaio, variou-se o ângulo de alimentação. Inicialmente em 65° , o ângulo foi aumentado para ocasionar os destacamentos. As imagens seguintes mostram alguns resultados obtidos.

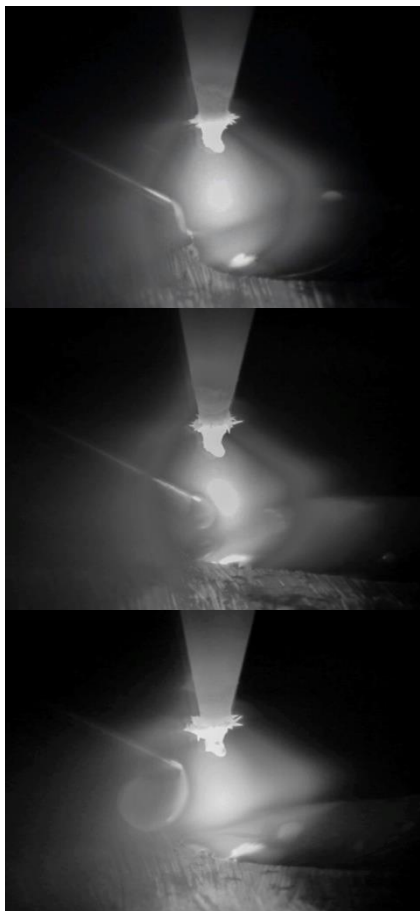


Figura 61 – Superior: Alimentação contínua; Centro: Alimentação destacada constante; Inferior: Alimentação destacada grosseira

Na imagem superior, o ângulo de alimentação em 65° proporcionou uma alimentação direta à poça. Nesta configuração não ocorrem destacamentos. O som existente é apenas o do arco elétrico e os oscilogramas característicos estão representados na Figura 59. Na imagem ao meio, com o ângulo variado, pode-se notar que o arame não toca mais a poça, e na ponta inicia-se a formação de uma gota devido ao calor do arco. Uma variação sutil de aproximadamente $1,5^\circ$ já foi o suficiente para causar os destacamentos constantes. O som gerado nesta situação é bastante característico, e o oscilograma é representado na imagem inferior da Figura 59. Na terceira imagem, com o ângulo ainda

maior, o arame entrava numa região em que o calor do arco o fundia antes de mesmo deste tocar a poça metálica, causando um crescimento grosseiro da gota e repelindo-a devido às forças eletromagnéticas presentes. Com este tipo de configuração, a contaminação do eletrodo é iminente, e deve ser evitada. Esta condição foi atingida com um ângulo de aproximadamente $68,5^\circ$.

Além do ângulo de alimentação, o destacamento pode ocorrer devido a uma velocidade de arame muito baixa para dada potência do arco. Se, nos ensaios acima, fossem reduzidas as velocidades de arame os resultados seriam bastante parecidos. Delgado (6), em seu trabalho, levantou relações V_a/P (velocidade de arame / Potência do arco) e definiu limites para uma alimentação contínua. Neste trabalho, não foram analisadas as relações de V_a/P , mas durante a realização dos ensaios deparou-se com uma situação de destacamento que pode ser explicado a partir desta relação.

A Figura 62 mostra os oscilogramas de corrente e velocidade de arame de um procedimento pulsado. Os parâmetros deste ensaio foram correntes de pulso e base em 180 A e 100 A, e velocidade de arame em 1,0 e 0,7 m/min para pulso e base respectivamente.

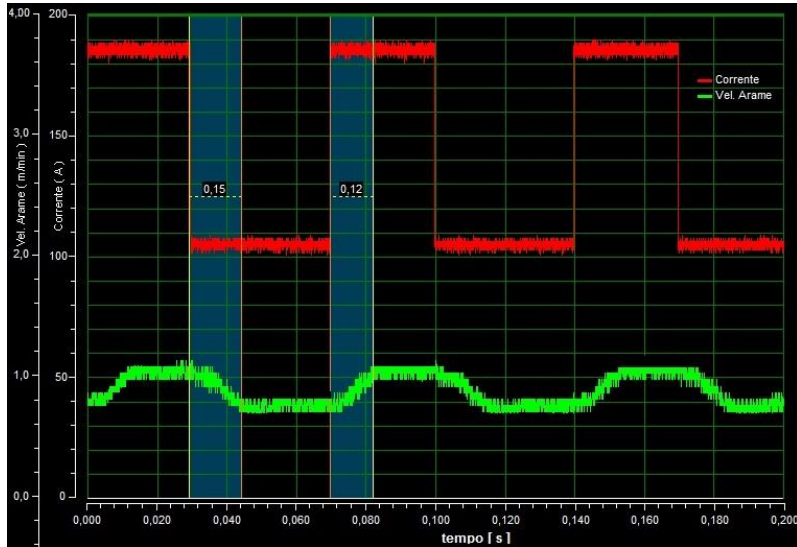


Figura 62 - Oscilogramas de corrente e velocidade de arame. Destacamento no início do pulso

O comportamento pulsado da corrente apresenta o formato de onda quadrada devido à elevada dinâmica da fonte, porém a variação da velocidade de arame não apresenta este comportamento. Note que a curva apresenta uma rampa de subida no início do pulso e uma de descida no início da base. Esta característica se dá devido à baixa dinâmica do alimentador de arame, que, ao mudar de fase, deve acelerar ou frear a alimentação, caracterizando o comportamento acima representado.

O resultado disto reflete em destacamentos da ponte arame-poça de fusão. No início da fase de pulso, observa-se que a velocidade de arame é baixa e leva aproximadamente 0,12 s (40 % do período de pulso) para atingir a velocidade regulada na fonte. Este período apresenta uma relação V_a/P bastante baixa, o que caracteriza em baixa velocidade de arame para uma elevada potência de arco.

Este comportamento pôde ser mais bem observado a partir de uma filmagem. A velocidade de arame em 1,0 m/min para a corrente regulada não acarreta em alimentação destacada, porém 0,7 m/min sim, a qual é a velocidade logo no início deste período.

No período de base, a rampa de descida tem duração aproximada de 0,15 s (37,5 % do período de base), porém a velocidade de arame é superior à regulada na fonte e não acarreta em destacamento, pelo contrário, o arame é excessivo no início da fase.

Alguns quadros selecionados do vídeo gravado mostram este destacamento no início do pulso. As imagens são mostradas na Figura 63.

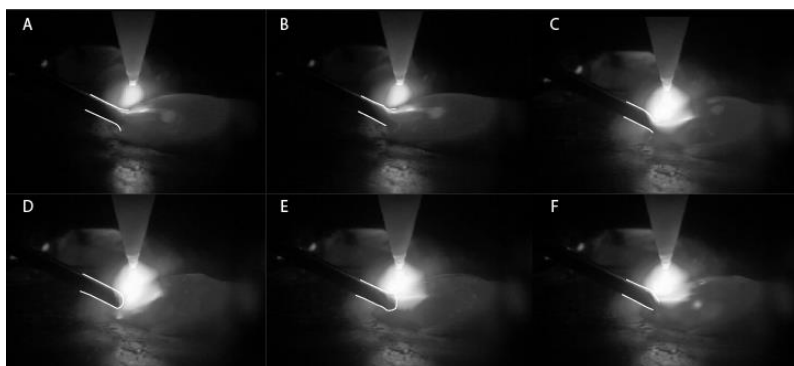


Figura 63 - Quadros da filmagem dos destacamentos no início do período de pulso.

Na figura anterior, os quadros A e B são do final período de base. Os quadros C, D E e F concernem o início do período de pulso. Note que em C, a ponte ainda é estável, mas em D já ocorre o rompimento. Para melhor verificação, uma filmagem em alta velocidade com aquisição de dados deve ser feita.

A fim de verificar as influências da alimentação destacada sobre os resultados do cordão, dois ensaios foram realizados. Um sobre a superfície do tubo e outro em um chanfro J padrão em procedimento de passe de raiz.

No primeiro deles, foram realizado 8 (oito) passes de solda, sendo 2 em cada posição de soldagem (Plana, Vertical Descendente, Sobre-Cabeça e Vertical Ascendente). Para cada posição um cordão foi realizado em alimentação contínua e outro em alimentação destacada a partir da variação do ângulo de alimentação. Os parâmetros utilizados são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros dos ensaios comparativos entre alimentação contínua e destacada

Parâmetros Regulados		
Parâmetro	Unidade	Valor
Corrente de Soldagem (Pulso/Base)	A	180/110
Velocidade de Arame (Pulso/Base)	m/min	1,2/0,7
Velocidade de Soldagem	cm/min	10
Tensão AVC (Pulso/Base)	V	10,0/8,4

Foram feitas metalografias das quatro posições de soldagem. Os resultados são mostrados em seguida na Figura 64.

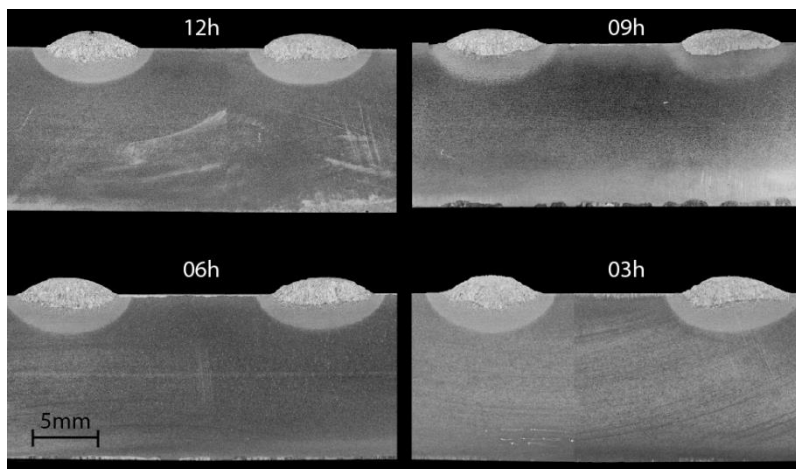
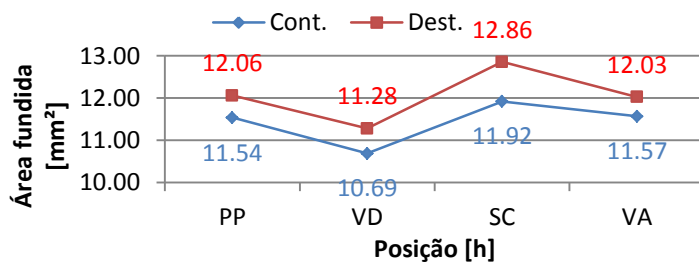


Figura 64 – Macrografias dos cordões com alimentação destacada (à esquerda de cada metalografia) e alimentação contínua (à direita)

Visualmente é possível notar que os cordões à direita, os quais foram feitos com alimentação contínua, apresentam maior ângulo de molhabilidade da poça, porém com penetração inferior aos cordões da esquerda. O arame sempre imerso na poça tende a empurrá-la contra o sentido da solda, uma vez que, a alimentação é feita pela frente do arco, de modo a espalhar-la lateralmente, resultando cordões mais largos. Os cordões à esquerda foram feitos com alimentação destacada. Note que são cordões com menor largura e maior altura.

Os valores geométricos foram medidos via *software* e plotados graficamente.



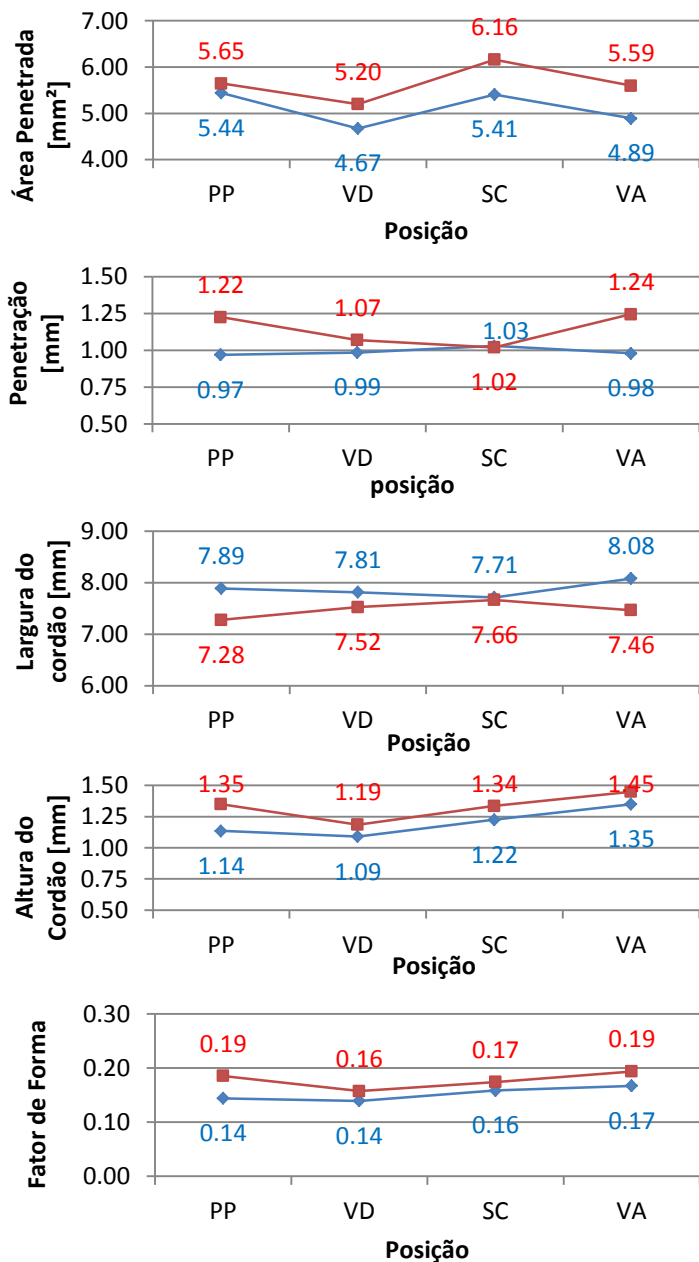


Figura 65 - Gráficos comparativos entre alimentação contínua e destacada

Todos os valores foram superiores para alimentação destacada, exceto a largura do cordão. Algumas destas geometrias são totalmente favoráveis ao passe de raiz, principalmente a largura do cordão como foi evidenciado nos ensaios descritos na 4.2.3. O fator de forma maior também refletiu em raízes mais uniformes e com menos rechupe. Ademais, a penetração e área fundida também foram maiores para os cordões à esquerda.

A fim de verificar se os resultados obtidos em depósito sobre chapa se repetiriam em um passe de raiz, foi destinado um CP com chanfro J padrão para o ensaio em 360° com alimentação destacada.

O ensaio foi realizado com os parâmetros utilizados nos CP's 7 e 8, e não foram variados ao longo do cordão. Neste CP tomou-se o cuidado de manter um ângulo de alimentação que mantivesse a alimentação destacada constantemente (situação da imagem central da Figura 61).

Foram feitas as metalografias de todas as posições, exceto às 2h, pois ocorreu um desvio de trajetória e não houve penetração total da raiz. As seções do cordão são mostradas na figura seguinte.

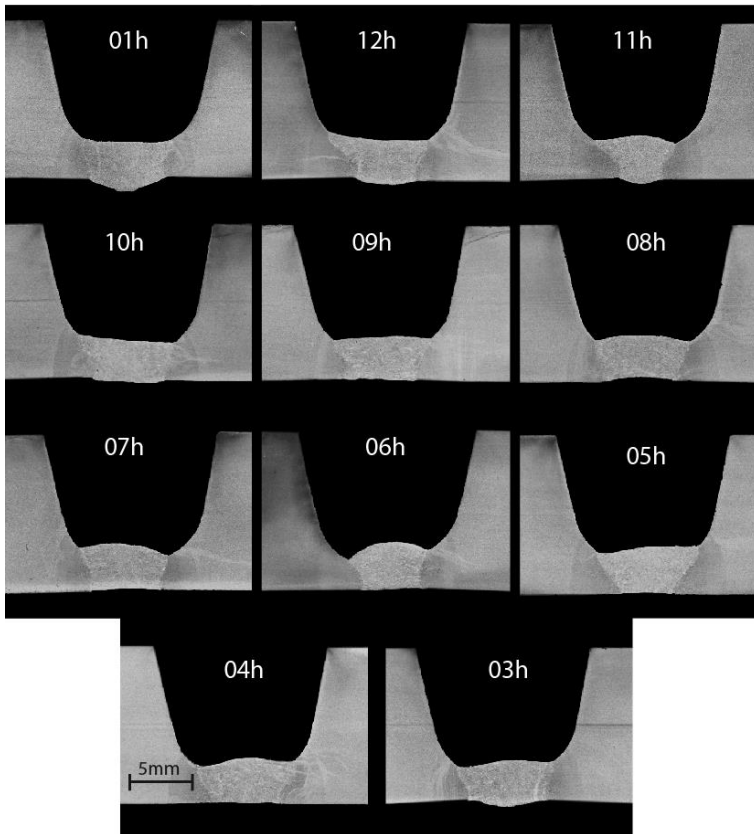
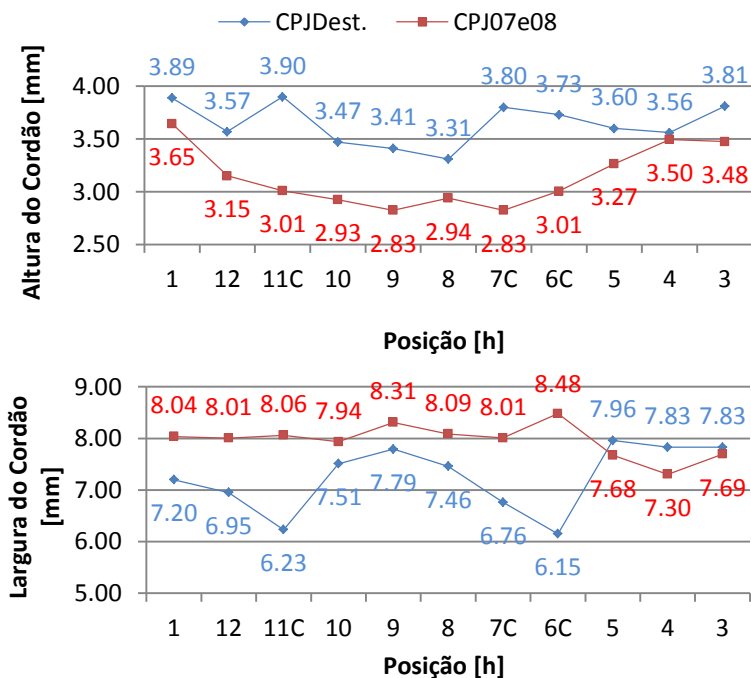


Figura 66 - Macrografias do ensaio orbital em 360° com alimentação destacada

O início de ensaio se deu na região referente à 1h e progressão anti-horária, como nos outros ensaios. Após a posição de 12h, a alimentação destacada provocou a contaminação do eletrodo. Notava-se que em alguns momentos, a alimentação formava gotas grosseiras como a mostrada na Figura 61. Essas gotas acabavam por tocar a ponta do eletrodo, contaminando-o. Na posição de 11h o eletrodo estava completamente contaminado e o procedimento foi interrompido e iniciado novamente com um eletrodo afiado. O mesmo fato ocorreu em aproximadamente 8h, onde então se seguiu com o eletrodo contaminado até a região de 6h.

Visualmente é possível notar uma distinção bastante grosseira entre as regiões onde o eletrodo estava completamente contaminado (11h e 6h) das demais. Nestas regiões a largura é menor e a altura do cordão maior, refletindo em um fator de forma bastante alto. Este comportamento pode ser verificado nos gráficos plotados na figura seguinte. Note que nas regiões onde o eletrodo estava contaminado, os valores são bastante distintos dos demais.



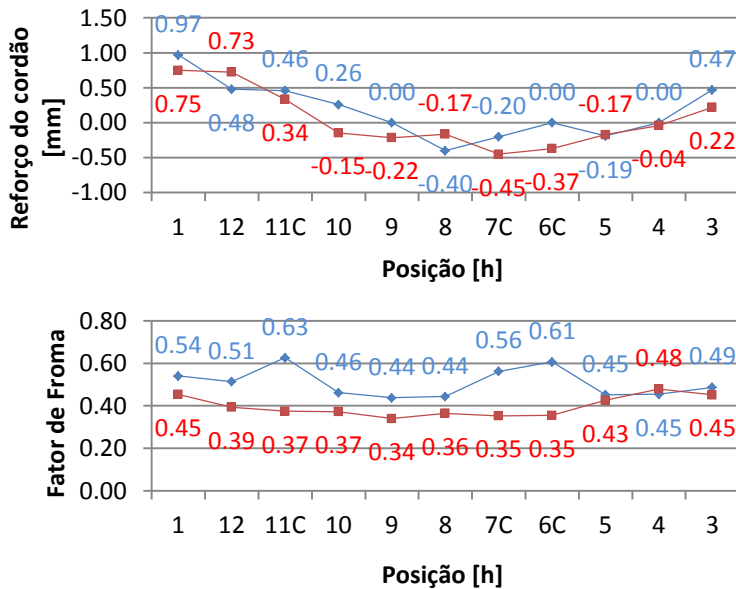


Figura 67 – Gráficos comparativos entre passe de raiz com alimentação destacada e contínua.

O comportamento da curva “reforço de raiz” foi bastante semelhante, embora os valores de concavidade tenham sido bem diferentes. A alimentação destacada também apresenta a tendência de cordões com menor concavidade da raiz nas posições vertical descendente e sobre-cabeça. Ademais, o fator de forma neste CP foi bastante superior comparado ao CP’s 07 e 08, caracterizando cordões menos largos e mais altos, corroborando os resultados obtidos sobre chapa (Figura 64)

Embora os resultados de raiz tenham sido satisfatórios, a alimentação destacada não se mostra uma alternativa para favorecer penetração e reduzir largura do cordão. As instabilidades geradas pela formação da gota na ponta do arame dificultam o bom andamento do processo, pois o eletrodo fica muito vulnerável a contaminação. A correção do ângulo de alimentação deve ser feita durante o procedimento buscando sempre uma alimentação contínua, de modo a promover um procedimento estável e robusto.

5 CONCLUSÕES

De modo geral pode-se dizer que os resultados obtidos mostraram competência do equipamento perante o processo orbital, bem como o levantamento e compreensão da problemática e de fatores determinantes e influentes na soldagem TIG orbital. No escopo deste trabalho foram abrangidos diversos fatores que atuam sobre os resultados, desde o processo de fabricação das juntas até o arranjo dos mangotes na bancada de ensaio, que interferiu diretamente na alimentação de arame em alguns ensaios orbitais; além dos procedimentos de soldagem estabelecidos.

Em relação ao equipamento, as melhorias efetuadas tiveram êxito em sua aplicação. O controle do AVC a partir de duas tensões de referência garantiu melhor controle do processo, permitindo a regulação de parâmetros bem definidos, atribuindo melhor acuracidade sobre o a energia de soldagem imposta à peça, bem como sanando a instabilidade de alimentação devido a variação da altura do arco.

O sincronismo entre a fonte e cabeçote foi crucial para que o sistema pudesse operar em correntes pulsadas. O método implementado se mostrou eficaz e de fácil operação. Ademais, os tempos de sincronismo regulados no cabeçote puderam ser confirmados pelas aquisições via SAP.

Ainda sobre os equipamentos, os dispositivos mecânicos projetados concederam um dos objetivos do estudo, que foi conferir as influências e metodologias para a alimentação do arame. O direcionador projetado permitiu as regulações necessárias, podendo ser alteradas durante o procedimento. A liberdade para atuar no ângulo de alimentação durante o procedimento previne possíveis contaminações no eletrodo, além de corrigir o tipo de alimentação, que em algumas situações, pode vir a ser destacada.

O estudo também consistiu de uma análise bastante abrangente das variáveis influentes sobre procedimentos orbitais. Iniciando pela fase de preparação da junta, os métodos de usinagem influem diretamente sobre os resultados. Para procedimentos manuais, o fato de se ter adoçamento pode não ser um grande problema, uma vez que, a junta será presente de *gap* e o preenchimento será monitorado pelo soldador, o que compensa possíveis *high-low* presentes no *top gap*. Porém para processos mecanizados, a uniformidade da junta é um requisito, pois as definições dos parâmetros são influenciadas pelas variações da geometria junta. Neste caso, o uso do ID-Tracker para evitar o processo de adoçamento foi crucial para os resultados e conclusões deste trabalho. Este dispositivo permitiu que a junta fosse

usinada uniformemente ao longo de toda a circunferência, garantindo resultados mais confiáveis, além de melhor controle do processo sobre a formação da raiz.

Ainda sobre fatores externos ao procedimento, o alinhador utilizado para a preparação dos corpos de prova permitiu um acoplamento entre peças muito bem alinhado, livre de *high-low*, e espaçamento entre os CP's. Assim como a geometria do chanfro, o alinhamento das peças também são fatores bastante relevantes para um procedimento qualificado. Com este dispositivo, concatenado com o uso do ID-Tracker, a ovalização presente nas peças se torna uma variável compensável. Além disto, no âmbito científico, o alinhador pode ser usado para “desnívelar” as peças, permitindo *high-lows* propositais, que foi o caso do CPJ09.

Quanto aos procedimentos orbitais, os resultados conferidos mostraram que os aspectos geométricos dos cordões resultantes apresentaram uma variação que se repetiu para diferentes níveis de energia e também na presença do *high-low*. Na posição plana foi verificado que a raiz tende a apresentar um reforço acentuado, fato este explicado pela ação gravitacional e também pela pressão imposta pelo arco, favorecendo o escorrimento para o lado interno do tudo. À medida que se adentra na região vertical descendente a penetração da raiz começa a reduzir e a concavidade torna-se presente. O ponto de inflexão se deu entre as regiões de 9 e 10h. À medida que o cordão prossegue para a região sobre-cabeça, a concavidade da raiz aumenta, mostrando seus valores máximos entre as regiões de 7 e 6h. Esta região foi o ponto de inflexão das curvas de “reforço da raiz”, onde a partir de então a concavidade passa a diminuir e o reforço aumentar.

Este comportamento geométrico permitiu que os ensaios com variação de parâmetros fossem diretos para as posições em que a concavidade e/ou reforço foram excessivos. A adequação dos parâmetros pela variação do nível de energia mostrou melhores resultados quando se variou o tempo de pulso, ao invés de corrente e velocidade de soldagem. Com uma energia de soldagem mais baixa, a poça se torna menos fluida, e com largura reduzida, não acopla-se aos flancos do chanfro. Estes fatores são determinantes na formação da concavidade de raiz. Ademais, o nível de energia reduzido, diminuiu os valores de reforço de raiz na posição plana.

O ensaio em 360° com variação de parâmetros mostrou uma geometria mais uniforme ao longo do cordão. Os níveis de reforço e concavidade da raiz foram reduzidos, em grande parte, à zero. O fator de forma neste cordão apresentou valores mais elevados e próximos entre

si, o que também define uniformidade geométrica. Neste caso, conclui-se que a variação dos parâmetros é de suma importância para garantir um cordão de solda uniforme. Este fator é relevante quando se trata de soldagem multi-passes, pois quando o preenchimento é variado nas diferentes posições, os passes de acabamento apresentam reforços excessivos ou até mesmo, exigem um passe extra para completar a solda em algumas regiões.

Outra conclusão que pode ser retirada a partir dos resultados geométricos é que um fator de forma mais alto, refletido pela diminuição da largura principalmente, concatenou em níveis de concavidade menores. Cordões que apresentam largura elevada ancoram a poça fundida nos flancos do chanfro que, tanto por forças devido tensão superficial tanto pelas contrações de solidificação, “puxam-na” para cima causando o rechupe.

Em relação à alimentação de arame, os ensaios comparativos entre alimentação destacada e contínua mostraram que, embora os resultados sejam favorecidos pela alimentação destacada, isto é, os cordões apresentam menor largura, maior penetração, e fatores de forma mais elevados, este tipo de alimentação não torna o processo robusto, pois a contaminação do eletrodo neste caso é iminente. Desse modo, a alimentação contínua do arame deve ser buscada e considerada como um requisito para a soldagem TIG orbital mecanizada. Este tipo de alimentação pode ser controlado por meio do ângulo de alimentação, não necessitando variações de parâmetros, o que mostra novamente a importância da liberdade de variar o ângulo no direcionador de arame.

Com os fatos descritos ao longo deste trabalho, pode-se concluir que o processo TIG orbital é uma alternativa para a soldagem do passe de raiz com grandes expectativas de crescimento de aplicações em campo, não apenas de ligas especiais, mas também de aços baixa liga/não ligados. O fato de ser possível um procedimento em 360° faz com que os parâmetros de produtividade não sejam definidos apenas em períodos de arco aberto, mas também na redução de tempos mortos. A possibilidade de um procedimento em 360° permite também que o cabeçote faça procedimentos em ambos os sentidos (horário e anti-horário). Isto representa uma grande vantagem, pois os passes de preenchimento podem ter as variações geométricas compensadas pela mudança e direção de soldagem, ora vertical ascendente, ora descendente, permitindo procedimentos sem variação de parâmetros ao longo da junta.

Além da possibilidade de soldagem do passe de raiz em um único passe de 360° , a soldagem TIG permite procedimentos multi-passes sem

a necessidade de preparação da junta, neste caso, fazer a “unha” entre os cordões, o que evita possíveis contaminações, reduz ainda mais os tempos mortos e poupa a necessidade de retrabalho, sendo esta, refletida também pelo fato do processo ser livre de escória e respingos. Neste caso, o procedimento usual entre passes se reduz apenas ao escovamento da superfície do cordão para remoção da camada de óxidos formada a cada passe.

Alguns comentários finais podem ser feitos sobre os aspectos gerais do estudo neste documento relatado. Este trabalho propôs uma contribuição para o avanço da tecnologia no país. Não é comum encontrar artigos ou até mesmo trabalhos acadêmicos sobre o tema, muito menos aplicações em campo. Neste sentido, os conhecimentos gerados e técnicas propostas são de grande valia para pesquisas futuras, sendo um ponto de partida para avanços na otimização dos equipamentos bem como a busca por procedimentos mais produtivos e robustos.

A soldagem orbital é um ramo da indústria que sempre trará maiores demandas, exigências e desafios com o passar do tempo devido ao constante crescimento na exploração do petróleo e gás, refletido também, pelo aumento do consumo energético. Assim sendo, é de suma importância que os laços entre as entidades acadêmicas e as indústrias se estreitem, agregando, de maneira simbiótica, conhecimento, experiência e avanços tecnológicos que reflitam significativamente no desenvolvimento do país.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como propostas para futuros trabalhos na área de soldagem TIG orbital ficam os seguintes temas:

- Comparar procedimentos orbitais com misturas gasosas ditas “mais quentes”, tais como Ar+H₂ e Ar+He, que possibilitem melhores resultados quanto à produtividade obtida com Ar puro;
- Buscar geometrias de chanfro que promovam redução do volume de material a ser preenchido, reduzindo gastos com usinagem dos tubos, metal de adição, tempo de arco aberto entre outros fatores;
- Realizar filmagens em alta velocidade com aquisição dos sinais para melhores observações das influencias das técnicas de alimentação de arame, bem como o processo em si;
- Realizar procedimentos de preenchimento e acabamento alternando as direções de soldagem a cada passe;
- Levantar um banco de dados com parametrização para diferentes chanfros, desnivelamentos, materiais, etc., para futuras implementações de segmento junta via sensores externos no cabeçote.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **PETROBRAS.** Atingimos nossa maior produção mensal histórica de petróleo no Brasil. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/atingimos-nossa-maior-producao-mensal-historica-de-petroleo-no-brasil.htm>>. Acessado em: Dez. 2014.
2. **Empresa de Pesquisa Energética - Ministério de Minas e Energia.** Plano Decenal de Expansão de Energia 2021. Brasília : s.n., 2012.
3. **VIGILIANO, R.** Brasil Concentrará 19% do Mercado de Dutos Offshore até 2012 - Energia Hoje - Disponível em: <<http://www.ctdut.org.br/blog/noticias/brasil-concentrara-19-do-mercado-de-dutos-offshore-ate-2017-energia-hoje>>. Acessado em: 28 nov. 2013.
4. **CIRINO, L. M.** *Estudos dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e Alternada pelos Processos TIG e MIG/MAG.* Florianópolis, Brasil : UFSC, 2009.
5. **CAMPBELL, R.D. e LaCOURSIERE, E. J.** A Guide to the Use of Tungsten Electrodes for GTA Welding. *Welding Journal*. Janeiro de 1995, Vol. 74, pp. 39-45.
6. **DELGADO, L. C.** *Estudo e Desenvolvimento do Processo TIG com Alimentação Automática do Arame.* Florianópolis, Brasil : UFSC, 2000.
7. **RICHARDSON, M.** Semiautomatic Cold Wire Feeder Systems Increase GTA Productivity. *Welding Journal*. Janeiro de 1995, Vol. 74, pp. 51-54.
8. **ESAB.** Soldagem de Tubulações. 2004.
9. **LUKKARI, J.** Orbital TIG - A Great Way to Join Pipes. *The ESAB Welding and Cutting Journal*. 1, 2006, Vol. 60, pp. 3-6.
10. **LATIF, H.** *Advanced Orbital Pipe Welding.* Lappeenranta, Finlândia : Lappeenranta University of Technology, 2012.
11. **SAGUES, P.** Adaptive control techniques advance automatic welding. *Welding Journal*. Agosto de 2010, Vol. 88, pp. 26-28.

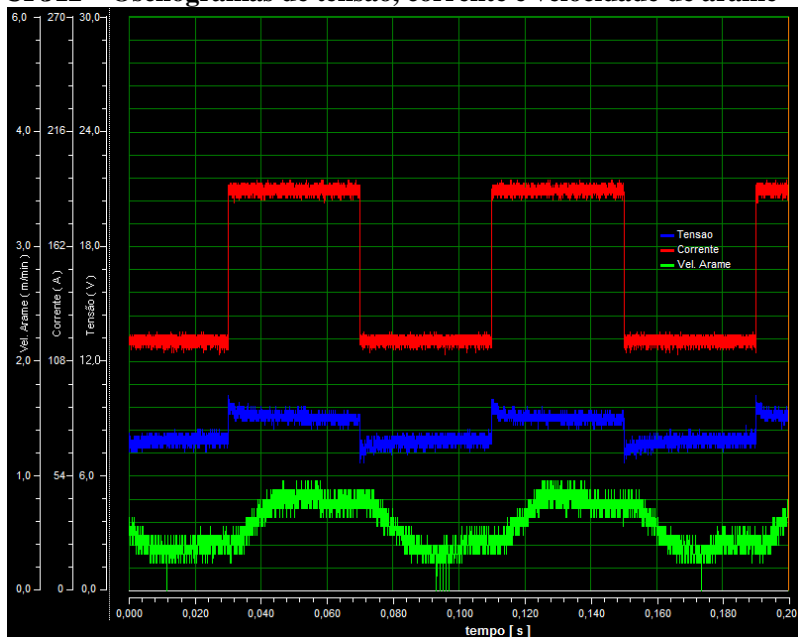
12. **FARIAS, A. M.** *Análise Microestrutural de Juntas de Aço Inoxidável UNS S32750 Soldadas pelos Processos Automáticos MIG/MAG e TIG Oorbital com Diferentes Aportes Térmicos e sua Influência na RESistência à Corrosão.* Rio de Jnaiero, Brasil : s.n., 2013.
13. **TEDESCHI, P. A. L., SIGNORELLI, R. e NEVES, M. D. M.** Comparação da Junta Soldada pelo Processo GTAW dos Aços Inoxidáveis AISI 316L e Superduplex UNS S32750 para Trocadores de Calor Usados em Refinarias de Petróleo. *XXXVI CONSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem.* 2010.
14. **HENON, B. K. e Brond, A. H.** Orbital welding best competition. *Welding Design and Fabrication.* 2002, Vol. 75, pp. 28-54.
15. **WIDGERY, D.J.** Mechanised Welding of Pipelines. *The ESAB Welding and Cutting Journal.* 2005, Vol. 6, pp. 23-26.
16. **PURNELL, S.** Orbital Welding Developments. *Welding and Cutting.* Março de 2004, pp. 150-152.
17. **WILSDORF, R. e PISTOR, R. SIXSMITH, J. J., JIN, H.** Welding Aluminum Pipe and The with Variable Polarity. *Welding Journal.* Abril de 2006, Vol. 85, pp. 42-43.
18. **PURNELL, S.** How to Achieve a Clean Process Line in Stainless Steel Pipes. *World Pumps.* 2003, pp. 17-18, 20-21.
19. **CUHEL, J.** GMAW Option Offer Increased Productivity in Pipe Fab Shops. s.l. : Welding Journal, Jun. 2008.
20. **RIBEIRO, J. C. B.** *Análise e Técnicas para Soldagem TIG Automática.* Florianópolis, Brasil : UFSC, 2012.
21. **POLYSOUDE.** The Orbital Welding Handbook. 2009.
22. **KIKEL, J. M.** Hot Wire Narrow Groove Welding and Cladding with Nickeld-Based Alloy. Chicago : AWS Hot Wire Welding and Cladding Conference, 2007.

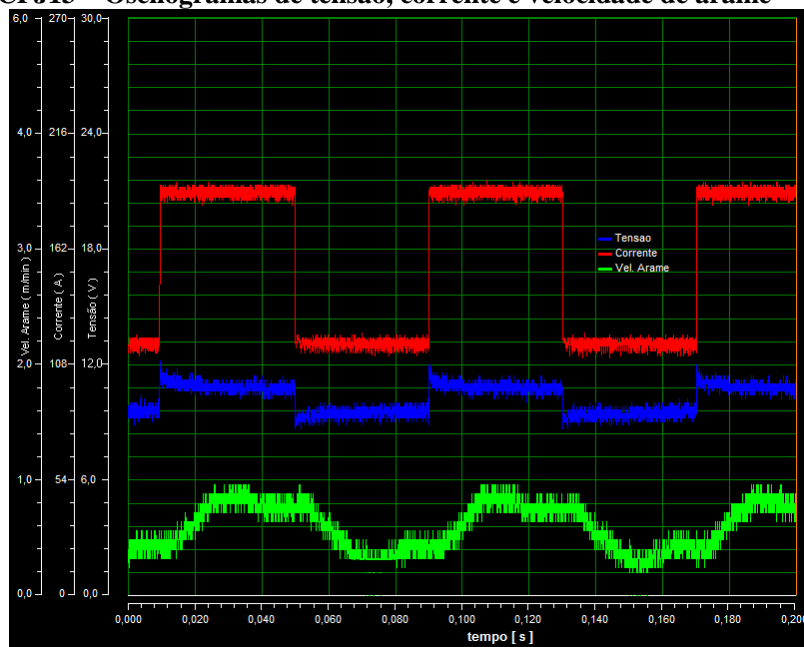
23. **BRUGGEMAN, L. C.** Investigações Prospectivas em Processos e Técnicas Para o Passe de Raiz na Soldagem MIG/MAG Orbital para Construção de Dutos. Florianópolis : UFSC, 2013.
24. **API - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE.** Welding os Pipelines and Related Facilities - API Standard 1104. Nov. 2005. 20ed.
25. **DNV - The Nrdske Veritas.** DNV-OS-F101 - - Offshore Standard - Submarine Pipeline System. Ago. 2012.
26. **FAN, H. G. e SHI, Y. W.** Numerical Simulation of Current Density in Gas Tungsten Arc Welding. s.l. : Journal of Materials Processing Technology, 1995. Vol. 61, pp. 302 - 308.
27. **SYKES, I. e DIGIACOMO, J.** Automatic Hot Wire GTA Welding of Pipe Offers Speed and Increased Deposition. *Welding Journal*. Julho de 1995, Vol. 74, pp. 53-56.
28. **NORDAHL, T.** Underwater Cables Joined With Orbital Welding. *Welding Journal*. Junho de 2007, Vol. 86, pp. 64-65.
29. **LAMBERT, J. A. e GILStON, P.F.** Hot-Wire GTAW for Nuclear Repairs . *Welding Journal*. Stembro de 1990, pp. 45-52.

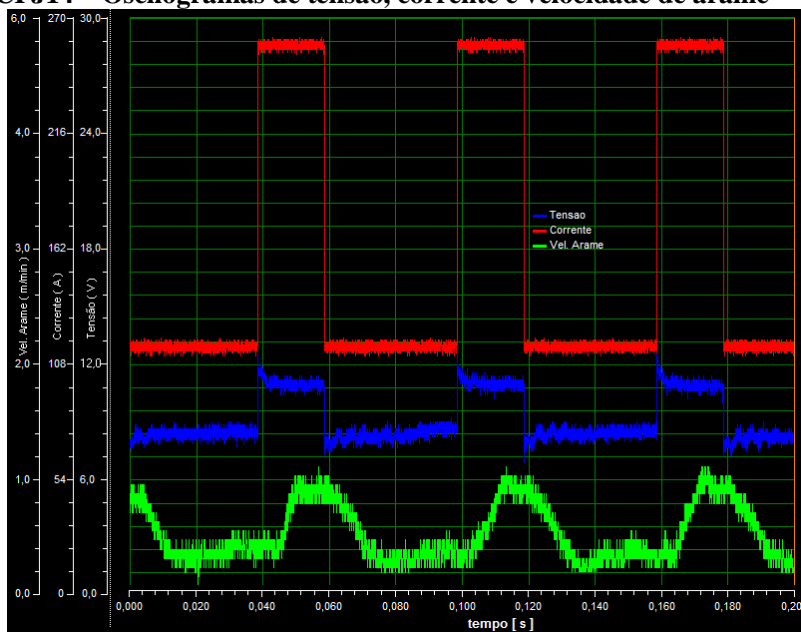
APÊNDICE A

Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame dos ensaios orbitais

CPJ12 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame



CPJ13 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame

CPJ14 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame

CPJ15 – Oscilogramas de tensão, corrente e velocidade de arame